



**TUGAS AKHIR - TE 141599**

**PENGARUH KONFIGURASI BELITAN  
TRANSFORMATOR DAYA TIGA-FASA TERHADAP  
FERORESONANSI PADA SISTEM JARINGAN DISTRIBUSI**

Dio Randa Damara  
NRP 2213 100 163

Dosen Pembimbing  
Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.  
I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda, ST., MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2017





**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**FINAL PROJECT - TE 141599**

***IMPACT OF THREE-PHASE POWER TRANSFORMER  
WINDING CONFIGURATION ON FERRORESONANCE IN  
DISTRIBUTION NETWORK SYSTEM***

Dio Randa Damara  
NRP 2213 100 163

Advisor

Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.  
I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda, ST., MT.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
Faculty of Electrical Technology  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2017



## **PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR**

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul **“Pengaruh Konfigurasi Belitan Transformator Daya Tiga-Fasa Terhadap Feroresonansi pada Sistem Jaringan Distribusi”** adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juli 2017

**Dio Randa Damara**  
NRP. 2213100163



**PENGARUH KONFIGURASI BELITAN TRANSFORMATOR  
DAYA TIGA-FASA TERHADAP FERORESONANSI PADA  
SISTEM JARINGAN DISTRIBUSI**

**TUGAS AKHIR**

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada  
Bidang Teknik Sistem Tenaga  
Departemen Teknik Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Menyetujui :**

**Dosen Pembimbing I,**

**Dosen Pembimbing II,**

**Dr. Eng. I Made Yulistya N., ST., M.Sc.**  
**NIP.19700712.199802.1 001**

**IGN Satriyadi H., ST., MT.**  
**NIP.19730123.200212.1 001**



**JULI, 2017**





# **PENGARUH KONFIGURASI BELITAN TRANSFORMATOR DAYA TIGA-FASA TERHADAP FERORESONANSI PADA SISTEM JARINGAN DISTRIBUSI**

**Nama : Dio Randa Damara**  
**Pembimbing I : Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.**  
**Pembimbing II : IG Ngurah Satriyadi Hernanda, ST., MT.**

## **ABSTRAK**

Operasi *switching* yang tidak seimbang pada *Circuit Breaker* (CB) dapat menyebabkan tegangan lebih akibat feroresonansi di sistem jaringan distribusi. Faktor utama munculnya fenomena feroresonansi dipengaruhi oleh beberapa hal, di antaranya yaitu jenis konfigurasi belitan transformator daya tiga fasa itu sendiri. Studi ini membahas tentang karakteristik feroresonansi akibat empat macam konfigurasi belitan transformator daya tiga fasa yang umum digunakan di sistem jaringan distribusi. Jenis konfigurasi belitan transformator distribusi yang dianalisis yaitu transformator daya tiga fasa terhubung Bintang-Bintang, Bintang-Segitiga, Segitiga-Bintang, dan Segitiga-Segitiga. Rangkaian sistem jaringan distribusi dan jenis konfigurasi belitan transformator distribusi dimodelkan dan disimulasikan menggunakan perangkat lunak EMTP/ATPDraw. Hasil simulasi yang diperoleh pada studi ini bahwa terdapat perbedaan karakteristik feroresonansi yang muncul dari perbedaan jenis konfigurasi belitan transformator daya tiga fasa apabila diberlakukan gangguan berupa operasi *switching* pada sistem. Transformator daya tiga fasa terhubung Bintang-Bintang paling rentan terhadap *overvoltage* akibat feroresonansi, sedangkan transformator daya tiga fasa terhubung Bintang-Segitiga memiliki pengaruh paling rendah terhadap *overvoltage* akibat feroresonansi.

**Kata Kunci— Feroresonansi, Konfigurasi Belitan, Transformator Daya, Transformator Distribusi, Transformator Tiga fasa, ATP/EMTP.**

*---Halaman ini sengaja dikosongkan---*

# **IMPACT OF THREE-PHASE TRANSFORMER WINDING CONFIGURATION ON FERRORESONANCE IN DISTRIBUTION NETWORK SYSTEM**

**Name : Dio Randa Damara**  
**Advisor I : Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.**  
**Advisor II : IG Ngurah Satriyadi Hernanda, ST., M.T.**

## **ABSTRACT**

The switching operation of Circuit Breaker (CB) can cause overvoltage due to ferroresonance in the distribution network system. The main factor of ferroresonance phenomenon is influenced by several things, including the type of winding configuration of three-phase power transformer itself. This study discusses the characteristics of ferroresonance due to four commonly used winding configurations of three-phase power transformers in distribution network systems. The winding configuration of the distribution power transformer which analyzed in this study are three-phase distribution power transformer connected in Star-Star, Star-Delta, Delta-Star, and Delta-Delta. The circuit of distribution network systems and the winding configuration of distribution power transformers are modeled and simulated using EMTP / ATPDraw software. The simulation results obtained in this study are the differences of ferroresonance characteristics that appear from the various types of three-phase power transformer winding configuration when switching operation occurs in the system. The three-phase power transformer connected in Star-Star is the most susceptible to overvoltage due to ferroresonance, whereas the three-phase power transformer connected in Star-Delta has the lowest influence on overvoltage due to ferroresonance.

**Keywords — Ferroresonance, Winding Configuration, Distribution Power Transformer, Three-Phase Transformer, ATP/EMTP.**

*---Halaman ini sengaja dikosongkan---*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat dan hidayat-Nya. Shalawat dan salam selalu tercurahkan kepada Nabi Besar Muhammad SAW, keluarga tercinta, sahabat serta kita semua selaku umatnya. Alhamdulillah penulis telah menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul **“Pengaruh Konfigurasi Belitan Transformator Daya Tiga-Fasa Terhadap Feroresonansi Pada Sistem Jaringan Distribusi”** tepat waktu.

Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan menyelesaikan pendidikan sarjana pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Pelaksanaan dan penyelesaian Tugas Akhir ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Kedua Orang tua penulis yaitu Ibunda Sulastri dan Ayahanda Pepen Effendi yang tiada henti memberikan doa, nasehat, dan semangat kepada penulis sehingga Tugas Akhir ini bisa terselesaikan tepat pada waktunya.
2. Bapak I Made Yulistya Negara, I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda, dan seluruh Dosen Laboratorium Tegangan Tinggi atas segala pengetahuannya dan waktunya dalam membimbing penulis sampai terselesaikannya Tugas Akhir ini.
3. Kakak Venny, Abang Ricky, Abang Randy, dan Kakak Mona yang selalu memberikan semangat dan tidak bosan dalam mengingatkan penulis untuk segera menyelesaikan tugas akhirnya.
4. Segenap keluarga besar yang selalu memberikan semangat dan hiburan kepada penulis selama mengerjakan Tugas Akhir ini.
5. Seluruh Dosen, dan Staff Karyawan Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, ITS yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.
6. Krishanti Andarini, Charell Naufal Kiramindyo selaku teman satu topik Tugas Akhir yang tidak henti-hentinya membantu dan memberikan solusi dalam proses pengerjaan Tugas Akhir.
7. Irfan, Ayyub, Maulana, Muhamad, Akbar, Ichan, dan Anisa selaku rekan-rekan asisten Laboratorium Tegangan Tinggi yang sama-sama berjuang dan saling memberikan semangat agar dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.

8. Mas Arief Budi Ksatria (Mas Jentrung), Mas Wahyudi, dan Mas Mikhael Vidi Santoso yang telah memberikan ilmu dan pengalamannya seputar Tugas Akhir ini.
9. Sahabat-sahabat *Eclus* (Elektro Cepat Lulus) dan *D'Bambangerz* (D'25) sebagai sahabat sekaligus saudara yang selalu mengingatkan penulis untuk segera menyelesaikan Tugas Akhir ini.
10. Teman-teman Angkatan 2013 lainnya yang membantu penulis dalam mengerjakan Tugas Akhir.
11. Rekan-rekan asisten dan member Laboratorium Tegangan Tinggi yang mengingatkan dan mendukung penulis selama penulisan Tugas Akhir.
12. Teman teman dan sahabat lainnya yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Penulis berharap semoga Tugas Akhir ini bermanfaat dan berguna bagi penulis khususnya dan juga bagi para pembaca pada umumnya.

Surabaya, Juli 2017

**Penulis**

# DAFTAR ISI

|                             | Hal |
|-----------------------------|-----|
| <b>HALAMAN JUDUL</b>        |     |
| <b>LEMBAR PERNYATAAN</b>    |     |
| <b>LEMBAR PENGESAHAN</b>    |     |
| <b>ABSTRAK</b> .....        | i   |
| <b>ABSTRACT</b> .....       | iii |
| <b>KATA PENGANTAR</b> ..... | v   |
| <b>DAFTAR ISI</b> .....     | vii |
| <b>DAFTAR GAMBAR</b> .....  | xv  |
| <b>DAFTAR TABEL</b> .....   | xix |

## BAB 1 PENDAHULUAN

|                                 |   |
|---------------------------------|---|
| 1.1 Latar Belakang .....        | 1 |
| 1.2 Sistematika Penulisan ..... | 3 |

## BAB 2 SISTEM TENAGA LISTRIK DAN TRANSFORMATOR DAYA

|  |    |
|--|----|
| 2.1 Sistem Tenaga Listrik .....              | 5  |
| 2.1.1 Sistem Penyaluran Tenaga Listrik.....  | 6  |
| 2.1.2 Sistem Penyaluran Langsung.....        | 6  |
| 2.1.3 Sistem Penyaluran Tidak Langsung ..... | 6  |
| 2.2 Sistem Transmisi .....                   | 6  |
| 2.3 Sistem Distribusi .....                  | 7  |
| 2.3.1 Gardu Induk.....                       | 7  |
| 2.3.1.1 Gardu Induk Konvensional             | 8  |
| 2.3.1.2 Gas Insulated Station (GIS)          | 8  |
| 2.3.2 Jaringan Distribusi Primer .....       | 9  |
| 2.3.3 Gardu Pembagi .....                    | 9  |
| 2.3.4 Jaringan Distribusi Sekunder .....     | 10 |
| 2.4 Transformator Daya.....                  | 10 |
| 2.4.1 Prinsip Kerja Transformator Daya ..... | 11 |
| 2.4.2 Kurva Histerisis Transformator.....    | 12 |
| 2.4.3 Hubungan Transformator Tiga Fasa.....  | 13 |
| 2.4.3.1 Hubungan Bintang (Y)                 | 13 |

|  |    |
|--|----|
| 2.4.3.2 Hubungan Segitiga / Delta ( $\Delta$ )                     | 13 |
| 2.4.4 Jenis-jenis Konfigurasi Belitan Transformator Daya Tiga Fasa | 14 |
| 2.4.4.1 Hubungan Bintang-Bintang (Y-Y)                             | 14 |
| 2.4.4.2 Hubungan Bintang-Segitiga (Y- $\Delta$ )                   | 15 |
| 2.4.4.3 Hubungan Segitiga-Bintang ( $\Delta$ -Y)                   | 15 |
| 2.4.4.4 Hubungan Segitiga-Segitiga ( $\Delta$ - $\Delta$ )         | 16 |

### BAB 3 FERORESONANSI DI SISTEM TENAGA LISTRIK

|  |    |
|--|----|
| 3.1 Resonansi  | 17 |
| 3.2 Feroresonansi  | 18 |
| 3.2.1 Munculnya Feroresonansi  | 19 |
| 3.2.2 Klasifikasi Feroresonansi  | 20 |
| 3.3 Simulasi Feroresonansi pada Sistem Tenaga Listrik                  | 22 |
| 3.3.1 Pemodelan Transformator Distribusi                               | 23 |
| 3.3.2 Konfigurasi Belitan Transformator Distribusi                     | 24 |
| 3.3.3 Rangkaian Feroresonansi Akibat Gangguan Operasi <i>Switching</i> | 26 |
| 3.4 Pengambilan Data dan Pengolahan Data                               | 27 |

### BAB 4 ANALISIS HASIL SIMULASI FERORESONANSI PADA EMPAT MACAM KONFIGURASI BELITAN TRANSFORMATOR DISTRIBUSI

|  |    |
|--|----|
| 4.1 Simulasi Rangkaian Feroresonansi dengan Transformator Distribusi Terhubung Bintang-Bintang (Y-Y)           | 29 |
| 4.1.1 Kondisi Normal   | 29 |
| 4.1.2 Kondisi Operasi <i>Switching</i> sistem Terbuka Satu Fasa  | 30 |
| 4.1.3 Kondisi Operasi <i>Switching</i> Sistem Terbuka Dua Fasa   | 31 |
| 4.1.4 Kondisi Operasi <i>Switching</i> Sistem Terbuka Tiga Fasa  | 33 |
| 4.1.5 Hasil Pengukuran Tegangan Transformator Distribusi Terhubung Bintang-Bintang                             | 34 |
| 4.2 Simulasi Rangkaian Feroresonansi dengan Transformator Distribusi Terhubung Bintang-Segitiga (Y- $\Delta$ ) | 34 |
| 4.2.1 Kondisi Normal   | 35 |
| 4.2.2 Kondisi Operasi <i>Switching</i> Sistem Terbuka Satu Fasa  | 36 |
| 4.2.3 Kondisi Operasi <i>Switching</i> Sistem Terbuka Dua Fasa   | 37 |
| 4.2.4 Kondisi Operasi <i>Switching</i> Sistem Terbuka Tiga Fasa  | 38 |



|  |    |
|--|----|
| 4.2.5 Hasil Pengukuran Tegangan Transformator Distribusi Terhubung Bintang-Segitiga.....                                       | 39 |
| 4.3 Simulasi Rangkaian Feroresonansi dengan Transformator Distribusi Terhubung Segitiga- Bintang ( $\Delta$ -Y).....           | 40 |
| 4.3.1 Kondisi Normal.....  | 40 |
| 4.3.2 Kondisi Operasi <i>Switching</i> Sistem Terbuka Satu Fasa ....   | 41 |
| 4.3.3 Kondisi Operasi <i>Switching</i> Sistem Terbuka Dua Fasa.....  | 42 |
| 4.3.4 Kondisi Operasi <i>Switching</i> Sistem Terbuka Tiga Fasa....  | 43 |
| 4.3.5 Hasil Pengukuran Tegangan Transformator Distribusi Terhubung Segitiga-Bintang.....                                       | 44 |
| 4.4 Simulasi Rangkaian Feroresonansi dengan Transformator Distribusi Terhubung Segitiga- Segitiga ( $\Delta$ - $\Delta$ )..... | 45 |
| 4.4.1 Kondisi Normal.....  | 45 |
| 4.4.2 Kondisi Operasi <i>Switching</i> Sistem Terbuka Satu Fasa ....   | 46 |
| 4.4.3 Kondisi Operasi <i>Switching</i> Sistem Terbuka Dua Fasa.....  | 47 |
| 4.4.4 Kondisi Operasi <i>Switching</i> Sistem Terbuka Tiga Fasa....  | 48 |
| 4.4.5 Hasil Pengukuran Tegangan Transformator Distribusi Terhubung Segitiga-Segitiga .....                                     | 49 |
| 4.5 Tegangan Puncak Transformator Distribusi.....  | 50 |

## BAB 5 PENUTUP

|                      |    |
|----------------------|----|
| 5.1 Kesimpulan ..... | 53 |
| 5.2 Saran.....       | 54 |

|                     |    |
|---------------------|----|
| DAFTAR PUSTAKA..... | 55 |
|---------------------|----|

|               |    |
|---------------|----|
| LAMPIRAN..... | 57 |
|---------------|----|

|                       |    |
|-----------------------|----|
| BIOGRAFI PENULIS..... | 61 |
|-----------------------|----|

*---Halaman ini sengaja dikosongkan---*

# LIST OF CONTENTS

|  | Page |
|--|------|
| <b>TITLE</b>   |      |
| <b>STATEMENT SHEET</b>   |      |
| <b>APPROVAL SHEET</b>  |      |
| <b>ABSTRAK</b> .....   | i    |
| <b>ABSTRACT</b> .....  | iii  |
| <b>PREFACE</b> .....   | v    |
| <b>LIST OF CONTENTS</b> .....                                      | vii  |
| <b>LIST OF FIGURES</b> .....                                       | xv   |
| <b>LIST OF TABLES</b> .....  | xix  |
| <br><b>CHAPTER 1 INTRODUCTION</b>                                  |      |
| 1.1 Background.....  | 1    |
| 1.2 Systematic of Report Writing.....                              | 3    |
| <br><b>CHAPTER 2 ELECTRICAL POWER SYSTEM AND POWER TRANSFORMER</b> |      |
| 2.1 Electrical Power System .....                                  | 5    |
| 2.1.1 Power Supply System.....                                     | 6    |
| 2.1.2 Direct Power Supply System .....                             | 6    |
| 2.1.3 Undirect Power Supply System .....                           | 6    |
| 2.2 Transmission System .....                                      | 6    |
| 2.3 Distribution System .....                                      | 7    |
| 2.3.1 Substation .....   | 7    |
| 2.3.1.1 Conventional Substation                                    | 8    |
| 2.3.1.2 Gas Insulated Station (GIS)                                | 8    |
| 2.3.2 Primary Distribution Network .....                           | 9    |
| 2.3.3 Substation Divider.....                                      | 9    |
| 2.3.4 Secondary Distribution Network.....                          | 10   |
| 2.4 Power Transformer .....  | 10   |
| 2.4.1 Working Principle of Power Transformer .....                 | 11   |
| 2.4.2 Transformer Hysterisis Curve .....                           | 12   |
| 2.4.3 Coupling of Three-Phase Transformer .....                    | 13   |
| 2.4.3.1 Star Coupling (Y)  | 13   |

|   |    |
|---|----|
| 2.4.3.2 Delta Coupling ( $\Delta$ )                       | 13 |
| 2.4.4 Three-Phase Power Transformer Winding Configuration | 14 |
| 2.4.4.1 Star-Star Configuration (Y-Y)                     | 14 |
| 2.4.4.2 Star- Delta Configuration (Y- $\Delta$ )          | 15 |
| 2.4.4.3 Delta-Star Configuration ( $\Delta$ -Y)           | 15 |
| 2.4.4.4 Delta-Delta Configuration ( $\Delta$ - $\Delta$ ) | 16 |

## CHAPTER 3 FERRORESONANCE ON ELECTRICAL POWER SYSTEM

|   |    |
|---|----|
| 3.1 Resonance .....   | 17 |
| 3.2 Ferroresonance .....  | 18 |
| 3.2.1 Appearance of Ferroresonance.....                             | 19 |
| 3.2.2 Classification of Ferroresonance.....                         | 20 |
| 3.3 Simulation of Ferroresonance Electrical Power System .....      | 22 |
| 3.3.1 Modeling of Distribution Power Transformer.....               | 23 |
| 3.3.2 Winding Configuration of Distribution Power Transformer ..... | 24 |
| 3.3.3 Ferroresonance Circuits Due to Switching Operation .....      | 26 |
| 3.4 Data Retrieval and Data Processing.....                         | 27 |

## CHAPTER 4 ANALYSIS OF SIMULATION RESULT OF FERRORESONANCE ON FOUR DISTRIBUTION POWER TRANSFORMER WINDING CONFIGURATION

|   |    |
|---|----|
| 4.1 Simulation of Ferroresonance Circuit with Distribution Transformer Connected Star-Star (Y-Y) .....          | 29 |
| 4.1.1 Normal Condition.....   | 29 |
| 4.1.2 Single-Phase Switching Operation .....  | 30 |
| 4.1.3 Two-Phase Switching Operation.....  | 31 |
| 4.1.4 Three-Phase Switching Operation.....  | 33 |
| 4.1.5 Simulation Result of Distribution Power Transformer Connected Star-Star.....                              | 34 |
| 4.2 Simulation of Ferroresonance Circuit with Distribution Transformer Connected Star-Delta (Y- $\Delta$ )..... | 34 |
| 4.2.1 Normal Condition.....   | 35 |
| 4.2.2 Single-Phase Switching Operation .....  | 36 |
| 4.2.3 Two-Phase Switching Operation.....  | 37 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 4.2.4 | Three-Phase Switching Operation.....   | 38 |
| 4.2.5 | Simulation Result of Distribution Power Transformer<br>Connected Star-Delta .....  | 39 |
| 4.3   | Simulation of Ferroresonance Circuit with Distribution<br>Transformer Connected Segitiga- Bintang ( $\Delta$ -Y) .....           | 40 |
| 4.3.1 | Normal Condition .....   | 40 |
| 4.3.2 | Single-Phase Switching Operation.....  | 41 |
| 4.3.3 | Two-Phase Switching Operation.....   | 42 |
| 4.3.4 | Three-Phase Switching Operation.....   | 43 |
| 4.3.5 | Simulation Result of Distribution Power Transformer<br>Connected Delta-Star .....  | 44 |
| 4.4   | Simulation of Ferroresonance Circuit with Distribution<br>Transformer Connected Segitiga- Segitiga ( $\Delta$ - $\Delta$ ) ..... | 45 |
| 4.4.1 | Normal Condition .....   | 45 |
| 4.4.2 | Single-Phase Switching Operation.....  | 46 |
| 4.4.3 | Two-Phase Switching Operation.....   | 47 |
| 4.4.4 | Three-Phase Switching Operation.....   | 48 |
| 4.4.5 | Simulation Result of Distribution Power Transformer<br>Connected Delta-Delta .....   | 49 |
| 4.5   | Peak Voltage of Distribution Power Transformer .....   | 50 |

## CHAPTER 5 FINAL

|     |                     |    |
|-----|---------------------|----|
| 5.1 | Conclusion .....    | 53 |
| 5.2 | Recommendation..... | 54 |

|                    |    |
|--------------------|----|
| BIBLIOGRAPHY ..... | 55 |
|--------------------|----|

|                  |    |
|------------------|----|
| ATTACHMENT ..... | 57 |
|------------------|----|

|                          |    |
|--------------------------|----|
| BIOGRAPHY OF AUTHOR..... | 61 |
|--------------------------|----|

*---Halaman ini sengaja dikosongkan---*

## DAFTAR GAMBAR

|  | Hal |
|--|-----|
| <b>Gambar 2.1</b> Skematik Sistem Tenaga Listrik.....  | 5   |
| <b>Gambar 2.2</b> Gardu Induk Konvensional .....   | 8   |
| <b>Gambar 2.3</b> Gardu Pembagi Jenis Tiang .....  | 9   |
| <b>Gambar 2.4</b> Jaringan Distribusi Sekunder 400/230 V .....   | 10  |
| <b>Gambar 2.5</b> Konstruksi Umum Transformator Daya .....   | 11  |
| <b>Gambar 2.6</b> Kurva Histerisis .....   | 12  |
| <b>Gambar 2.7</b> Transformator Tiga Fasa Hubungan Bintang .....   | 13  |
| <b>Gambar 2.8</b> Transformator Tiga Fasa Hubungan Segitiga .....  | 14  |
| <b>Gambar 2.9</b> Transformator Tiga Fasa Hubungan Y-Y .....   | 15  |
| <b>Gambar 2.10</b> Transformator Tiga Fasa Hubungan Y- $\Delta$ .....  | 15  |
| <b>Gambar 2.11</b> Transformator Tiga Fasa Hubungan $\Delta$ -Y .....  | 16  |
| <b>Gambar 2.12</b> Transformator Tiga Fasa Hubungan $\Delta$ - $\Delta$ .....                                  | 16  |
| <b>Gambar 3.1</b> Resonansi Seri .....   | 18  |
| <b>Gambar 3.2</b> Rangkaian Feroresonansi .....  | 19  |
| <b>Gambar 3.3</b> Kurva Saturasi Induktansi Non-linear .....   | 20  |
| <b>Gambar 3.4</b> Fundamental Mode .....   | 21  |
| <b>Gambar 3.5</b> Subharmonic Mode .....   | 21  |
| <b>Gambar 3.6</b> Quasi-periodic Mode .....  | 22  |
| <b>Gambar 3.7</b> Chaotic Mode .....   | 22  |
| <b>Gambar 3.8</b> Simulasi Rangkaian Feroresonansi .....   | 23  |
| <b>Gambar 3.9</b> Kurva Karakteristik Magnetisasi<br>Transformator Distribusi .....                            | 24  |
| <b>Gambar 3.10</b> Simulasi Feroresonansi dengan Transformator<br>Distribusi Terhubung Bintang-Bintang .....   | 25  |
| <b>Gambar 3.11</b> Simulasi Feroresonansi dengan Transformator<br>Distribusi Terhubung Bintang-Segitiga .....  | 25  |
| <b>Gambar 3.12</b> Simulasi Feroresonansi dengan Transformator<br>Distribusi Terhubung Segitiga-Bintang .....  | 25  |
| <b>Gambar 3.13</b> Simulasi Feroresonansi dengan Transformator<br>Distribusi Terhubung Segitiga-Segitiga ..... | 26  |
| <b>Gambar 3.14</b> Rangkaian Simulasi Feroresonansi Akibat<br>Operasi <i>Switching</i> .....                   | 26  |
| <b>Gambar 3.15</b> <i>Flowchart</i> Proses Pengambilan Data dan<br>Pengolahan Data .....                       | 27  |

|                    |  |    |
|--------------------|--|----|
| <b>Gambar 4.1</b>  | Simulasi Feroresonansi dengan Transformator Distribusi Terhubung Bintang-Bintang.....  | 29 |
| <b>Gambar 4.2</b>  | Respon Tegangan Transformator Distribusi Terhubung Bintang-Bintang dalam Kondisi Normal .....                                | 30 |
| <b>Gambar 4.3</b>  | Respon Tegangan Transformator Distribusi Terhubung Bintang-Bintang dalam Kondisi <i>Switching</i> di Fasa S.....             | 31 |
| <b>Gambar 4.4</b>  | Respon Tegangan Transformator Distribusi Terhubung Bintang-Bintang dalam Kondisi <i>Switching</i> di Fasa S dan T .....      | 32 |
| <b>Gambar 4.5</b>  | Respon Tegangan Transformator Distribusi Terhubung Bintang-Bintang dalam Kondisi <i>Switching</i> di Fasa R, S, dan T .....  | 33 |
| <b>Gambar 4.6</b>  | Simulasi Feroresonansi dengan Transformator Distribusi Terhubung Bintang-Segitiga .....                                      | 34 |
| <b>Gambar 4.7</b>  | Respon Tegangan Transformator Distribusi Terhubung Bintang-Segitiga dalam Kondisi Normal .....                               | 35 |
| <b>Gambar 4.8</b>  | Respon Tegangan Transformator Distribusi Terhubung Bintang-Segitiga dalam Kondisi <i>Switching</i> di Fasa S.....            | 36 |
| <b>Gambar 4.9</b>  | Respon Tegangan Transformator Distribusi Terhubung Bintang-Segitiga dalam Kondisi <i>Switching</i> di Fasa S dan T .....     | 37 |
| <b>Gambar 4.10</b> | Respon Tegangan Transformator Distribusi Terhubung Bintang-Segitiga dalam Kondisi <i>Switching</i> di Fasa R, S, dan T ..... | 38 |
| <b>Gambar 4.11</b> | Simulasi Feroresonansi dengan Transformator Distribusi Terhubung Segitiga-Bintang .....                                      | 40 |
| <b>Gambar 4.12</b> | Respon Tegangan Transformator Distribusi Terhubung Segitiga-Bintang dalam Kondisi Normal. ....                               | 40 |
| <b>Gambar 4.13</b> | Respon Tegangan Transformator Distribusi Terhubung Segitiga-Bintang dalam Kondisi <i>Switching</i> di Fasa S.....            | 41 |
| <b>Gambar 4.14</b> | Respon Tegangan Transformator Distribusi Terhubung Segitiga-Bintang dalam Kondisi  |    |



|                    |   |    |
|--------------------|---|----|
|                    | <i>Switching</i> di Fasa S dan T.....   | 42 |
| <b>Gambar 4.15</b> | Respon Tegangan Transformator Distribusi<br>Terhubung Segitiga-Bintang dalam Kondisi<br><i>Switching</i> di Fasa R, S, dan T. ....  | 43 |
| <b>Gambar 4.16</b> | Simulasi Feroresonansi dengan Transformator<br>Distribusi Terhubung Segitiga-Segitiga. ....   | 45 |
| <b>Gambar 4.17</b> | Respon Tegangan Transformator Distribusi<br>Terhubung Segitiga-Segitiga dalam Kondisi<br>Normal.....                                | 45 |
| <b>Gambar 4.18</b> | Respon Tegangan Transformator Distribusi<br>Terhubung Segitiga-Segitiga dalam Kondisi<br><i>Switching</i> di Fasa S.....            | 46 |
| <b>Gambar 4.19</b> | Respon Tegangan Transformator Distribusi<br>Terhubung Segitiga-Segitiga dalam Kondisi<br><i>Switching</i> di Fasa S dan T.....      | 47 |
| <b>Gambar 4.20</b> | Respon Tegangan Transformator Distribusi<br>Terhubung Segitiga-Segitiga dalam Kondisi<br><i>Switching</i> di Fasa R, S, dan T ..... | 48 |
| <b>Gambar 4.21</b> | Grafik Tegangan Puncak Transformator Distribusi   | 51 |



## DAFTAR TABEL

|   | Hal |
|---|-----|
| <b>Tabel 3.1</b> Parameter Transformator Distribusi .....   | 23  |
| <b>Tabel 4.1</b> Hasil Pengukuran Tegangan Transformator<br>Distribusi Terhubung Bintang-Bintang.....   | 33  |
| <b>Tabel 4.2</b> Hasil Pengukuran Tegangan Transformator<br>Distribusi Terhubung Bintang-Segitiga ..... | 38  |
| <b>Tabel 4.3</b> Hasil Pengukuran Tegangan Transformator<br>Distribusi Terhubung Segitiga-Bintang ..... | 43  |
| <b>Tabel 4.4</b> Hasil Pengukuran Tegangan Transformator<br>Distribusi Terhubung Segitiga-Segitiga..... | 48  |

*---Halaman ini sengaja dikosongkan---*

# **BAB 1**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Tidak dapat dipungkiri bahwa kebutuhan tenaga listrik menjadi salah satu kebutuhan utama dalam menjalani kehidupan di masa kini. Pada umumnya, tenaga listrik dihasilkan oleh pembangkit listrik yang kemudian disalurkan melalui sistem tenaga listrik, seperti sistem transmisi dan sistem distribusi, sebelum mencapai konsumennya. Sistem tenaga listrik merupakan sistem yang terdiri dari berbagai macam peralatan listrik dengan fungsinya masing-masing yang tergabung menjadi suatu sistem sehingga memungkinkan adanya penyaluran tenaga listrik dari pembangkit listrik hingga konsumen. Agar tercipta penyaluran tenaga listrik yang andal, maka peralatan-peralatan listrik yang tergabung pada sistem tenaga listrik tersebut dituntut untuk dapat berfungsi secara optimal. Salah satu peralatan listrik yang harus berfungsi secara optimal adalah transformator.

Di dalam sistem distribusi, transformator daya merupakan peralatan listrik yang berperan penting dalam penyaluran tenaga listrik. Jenis transformator yang umum dipakai dalam penyaluran tenaga listrik ini dapat disebut sebagai transformator distribusi. Transformator distribusi memiliki fungsi untuk menaikkan atau menurunkan level tegangan yang tersalurkan pada sistem jaringan distribusi. Penggunaan transformator distribusi ini dalam sistem tenaga listrik ini bertujuan untuk mengurangi adanya rugi-rugi daya ketika dalam proses penyaluran tenaga listrik.

Pada umumnya, transformator distribusi sebagai penyalur tenaga listrik ini merupakan sebuah peralatan listrik yang memiliki dua atau lebih kumparan. Kumparan yang terhubung oleh pembangkit listrik atau sumber energi adalah kumparan sisi primer, sedangkan kumparan yang terhubung oleh beban adalah kumparan sisi sekunder [1]. Sambungan kedua sisi kumparan tersebut pada sebuah transformator dapat menentukan jenis dari konfigurasi belitan suatu transformator distribusi. Konfigurasi belitan dari sebuah transformator distribusi yang umum digunakan adalah konfigurasi belitan bintang (Y) dan konfigurasi belitan segitiga ( $\Delta$ ). Berbagai macam variasi kombinasi dari konfigurasi belitan pada kedua sisi sebuah transformator distribusi menjadikan adanya perbedaan karakteristik dari transformator distribusi tersebut [2]. Hal ini

terjadi karena adanya perbedaan tegangan yang tersalurkan akibat perbedaan konfigurasi belitan pada transformator tersebut.

Adanya gangguan yang mungkin terjadi pada sistem tenaga listrik merupakan faktor penyebab menurunnya kinerja dari peralatan listrik, tanpa terkecuali transformator distribusi. Salah satu gangguan yang kerap kali terjadi adalah gangguan tegangan lebih pada level tegangan yang tersalurkan. Gangguan ini menjadi salah satu faktor yang kerap kali mengakibatkan rusaknya peralatan listrik yang terhubung pada suatu sistem tenaga listrik, karena tegangan yang tersalurkan dapat melebihi rating tegangan dari peralatan listrik tersebut. Tegangan lebih ini berupa lonjakan nilai tegangan yang berosilasi atau bergetar secara cepat dengan frekuensi tinggi pada suatu fasa gelombang tegangan. Fenomena inilah yang dikenal sebagai fenomena feroresonansi.

Feroresonansi adalah fenomena kelistrikan yang memadukan antara beberapa hal yaitu nilai kapasistansi yang didapat dari saluran kabel sistem tenaga listrik, nilai induktansi magnetisasi non-linear yang didapat dari inti transformator, dan adanya pemicu sesaat seperti *switching* [3]. Fenomena ini yang dapat mengakibatkan adanya lonjakan nilai tegangan yang tersalurkan sehingga bersifat berbahaya bagi peralatan listrik dan berujung pada menurunnya tingkat keandalan dari sistem tenaga listrik tersebut.

Di dalam studi ini akan dibahas mengenai fenomena feroresonansi dengan melakukan pemodelan simulasi terhadap transformator distribusi pada sistem distribusi 20 kV. Masalah dalam studi ini dibatasi pada analisis kemunculan fenomena feroresonansi yang mungkin terjadi dari empat macam konfigurasi belitan transformator distribusi pada sistem distribusi 20 kV apabila diberlakukan proses *switching*. Metode analisis yang dilakukan pada studi ini yaitu dengan membandingkan hasil plot tegangan dari empat macam percobaan simulasi rangkaian feroresonansi tersebut.

Tujuan yang ingin dicapai studi ini adalah untuk mendapatkan karakteristik feroresonansi yang dihasilkan dari perbedaan konfigurasi belitan transformator distribusi berdasarkan plot hasil tegangan yang diperoleh, sehingga dapat diketahui transformator distribusi dengan konfigurasi belitan yang tahan maupun rentan terhadap pengaruh feroresonansi agar dapat melakukan pemilihan penggunaan transformator yang tepat, efektif, dan efisien bagi penyaluran tenaga listrik.

Metode yang digunakan dalam studi ini, yang pertama adalah melakukan studi literatur serta pengumpulan data mengenai feroresonansi

dan metode umum yang biasa digunakan untuk menganalisis. Kemudian adalah menentukan parameter dari komponen yang akan digunakan dalam rangkaian pemodelan, seperti nilai kapasitansi, nilai induktansi non-linear, serta nilai resistansi dari suatu sistem. Langkah berikutnya adalah melakukan pemodelan rangkaian simulasi menggunakan perangkat lunak ATPDraw. Setelah rangkaian pemodelan disimulasikan, akan dilakukan analisis terhadap hasil keluaran dari simulasi tersebut berupa grafik fungsi tegangan terhadap waktu sebagai rujukan untuk menarik kesimpulan studi ini.

## **1.2 Sistematika Penulisan**

Bab I berisi pendahuluan yang mengandung latar belakang, permasalahan, batasan masalah, tujuan, metode penelitian, sistematika penulisan, serta manfaat dan relevansi yang dicapai dalam pelaksanaan studi ini.

Bab II berisi teori-teori pendukung mengenai sistem tenaga listrik khususnya sistem distribusi serta membahas transformator distribusi dengan berbagai macam konfigurasi belitannya.

Bab III berisi teori-teori feroresonansi pada sistem tenaga listrik serta pemodelan simulasi rangkaian feroresonansi dengan meninjau pada empat macam konfigurasi belitan transformator distribusi ketika diberlakukan gangguan sesaat *switching*, simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak ATPDraw.

Bab IV berisi hasil dari simulasi pemodelan rangkaian feroresonansi yang telah dilakukan, kemudian dilakukan analisis terhadap kemunculan feroresonansi pada tiap-tiap rangkaian pemodelan tersebut.

Bab V berisi kesimpulan yang dapat diambil berdasarkan hasil analisis dan saran yang bersangkutan dengan studi ini baik yang telah dilakukan maupun untuk penelitian atau studi kedepannya.

*-----halaman ini sengaja dikosongkan-----*



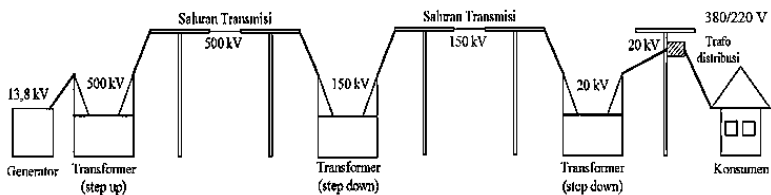
## BAB 2

# SISTEM TENAGA LISTRIK DAN TRANSFORMATOR DAYA

### 2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik merupakan hal penting untuk dipelajari. Di dunia ketenagalistrikan terdapat tiga bagian penting dalam penyaluran tenaga listrik, yaitu Pembangkitan, Penyaluran (Transmisi), dan Distribusi. Sebuah pembangkit tenaga listrik pada umumnya terletak begitu jauh dari pusat beban atau pemukiman masyarakat. Oleh karena itu diperlukan suatu jaringan penyaluran yang dapat menyalurkan tenaga listrik kepada konsumen yang biasa kita sebut sebagai sistem saluran transmisi dan sistem saluran distribusi.

Tegangan sebuah generator pembangkit relatif rendah yaitu berkisar 6 kV sampai dengan 24 kV. Pada kenyataannya letak pusat pembangkit tenaga listrik berjauhan dengan lokasi pusat beban, oleh karena itu diperlukan peningkatan tegangan yang bertujuan untuk memperbesar daya hantar dari saluran transmisi dan untuk memperkecil rugi daya atau susut tegangan pada saluran transmisi. Tegangan tersebut perlu dinaikkan dengan menggunakan transformator sebelum disalurkan melalui sistem saluran transmisi hingga berkisar 150 kV sampai dengan 500 kV. Melalui sistem saluran transmisi, tenaga listrik yang dihasilkan dari beberapa pusat pembangkit yang lokasinya berjauhan akan dapat terhubung untuk mensuplai keperluan tenaga listrik di beberapa pusat beban. Skematik sistem tenaga listrik dapat dilihat pada gambar 2.1.



**Gambar 2.1** Skematik Sistem Tenaga Listrik

Setelah melewati saluran transmisi, maka tenaga listrik perlu diturunkan tegangannya sebelum disalurkan kepada konsumen. Terdapat beberapa tahap penurunan tegangan yang dilakukan setelah tenaga listrik melalui sistem saluran transmisi. Penurunan tegangan yang pertama kali

dilakukan berada di Gardu Induk (GI) dengan menurunkan tegangan dari 500 kV ke 150 kV ataupun 150 kV ke 70 kV. Setelah itu, masih perlu adanya penurunan tegangan yang kedua yaitu 150 kV ke 20 kV ataupun 70 kV ke 20 kV pada Gardu Distribusi. Setelah tenaga listrik melewati Gardu Distribusi, untuk menyalurkan tenaga listrik ke konsumen rumah tangga, perlu adanya penurunan tegangan lagi yang dilakukan oleh transformator distribusi hingga level tegangan 380/220 V.

### **2.1.1 Sistem Penyaluran Tenaga Listrik**

Sistem penyaluran tenaga listrik merupakan sistem kelistrikan yang menyalurkan tenaga listrik dari pusat pembangkit tenaga listrik hingga sampai kepada pusat beban (konsumen). Pada kenyataannya, sistem penyaluran tenaga listrik dibedakan menjadi dua bagian, yaitu sistem penyaluran langsung dan sistem penyaluran tidak langsung [7].

### **2.1.2 Sistem Penyaluran Langsung**

Sistem penyaluran langsung adalah sistem yang melakukan penyaluran tenaga listrik dari pusat pembangkit tenaga listrik kepada pusat-pusat beban secara langsung, tanpa melalui jaringan transmisi terlebih dahulu. Biasanya sistem ini digunakan khusus pusat-pusat beban yang berada tidak jauh dari pusat pembangkit tenaga listrik [7].

### **2.1.3 Sistem Penyaluran Tidak Langsung**

Sistem penyaluran tidak langsung adalah sistem yang melakukan penyaluran tenaga listrik dengan melalui jaringan transmisi sebagai perantara bagi pembangkit tenaga listrik sebelum dihubungkan dengan jaringan distribusi yang menyalurkan tenaga listrik ke konsumen. Biasanya sistem ini digunakan jika pusat pembangkit tenaga listrik berada jauh dari pusat beban [7].

## **2.2 Sistem Transmisi**

Sistem transmisi merupakan bagian terpenting dari sistem tenaga listrik karena berfungsi sebagai penghubung pusat-pusat pembangkit tenaga listrik yang terinterkoneksi antara satu dengan lainnya. Sistem transmisi merupakan wadah penyaluran tenaga listrik dari pusat pembangkit hingga konsumen melalui media hantar yaitu konduktor, atau yang biasa disebut sebagai kabel. Penggunaan jenis konduktor ini disesuaikan dengan kondisi lingkungan pada suatu sistem transmisi.

Tegangan yang dialirkan melalui saluran transmisi merupakan level tegangan yang tinggi, karena bertujuan untuk mengecilkan rugi-rugi

daya atau susut tegangan pada tenaga listrik yang disalurkan. Hal tersebut dapat dijelaskan pada kedua persamaan 2.1 dan 2.2 di bawah ini.

$$V = I.Z \quad (2.1)$$

Keterangan :         $V$  = Tegangan (Volt)  
                          $I$  = Arus (Ampere)  
                          $Z$  = Impedansi (Ohm)

$$P_{loss} = I^2.Z \quad (2.2)$$

Keterangan :         $P_{loss}$  = Rugi-rugi Daya (Watt)  
                          $I$     = Arus (Ampere)  
                          $Z$     = Impedansi (Ohm)

Ketika nilai tegangan diperbesar dengan nilai impedansi yang tetap maka diperoleh nilai arus yang semakin kecil. Dengan nilai arus yang semakin kecil akan mempengaruhi nilai rugi-rugi daya pada sistem transmisi. Mengecilnya nilai arus berdampak besar terhadap daya yang hilang pada saluran transmisi tersebut. Daya yang hilang akan semakin berkurang karena arus yang timbul menjadi lebih kecil ketika diterapkan tegangan yang tinggi.

## 2.3 Sistem Distribusi

Tidak jauh berbeda dengan sistem transmisi, sistem distribusi merupakan sistem tenaga listrik yang berfungsi menyalurkan tenaga listrik kepada konsumen melalui sistem jaringan tegangan menengah hingga rendah. Sistem distribusi tenaga listrik terdiri dari beberapa bagian seperti di bawah ini.

### 2.3.1 Gardu Induk

Gardu induk merupakan bagian penting dalam penyaluran tenaga listrik dari pembangkit hingga dapat digunakan oleh konsumen [6]. Apabila sistem penyaluran tenaga listrik dilakukan secara langsung, maka bagian pertama sistem distribusi tenaga listrik adalah pusat pembangkit tenaga listrik. Apabila sistem penyaluran tenaga listrik dilakukan secara tidak langsung, maka bagian pertama dari sistem distribusi tenaga listrik adalah Gardu Induk yang berfungsi menurunkan tegangan dari sistem jaringan transmisi dan menyalurkan tenaga listrik melalui jaringan distribusi primer. Gardu induk terdiri dari peralatan-peralatan listrik yang digunakan untuk menjaga kontinuitas tenaga listrik. Gardu induk dibagi menjadi beberapa bagian besar, yaitu *Switchyard* pada gardu

pembangkitan, Gardu Induk Pelanggan, *Switching Station*, dan Gardu Induk Distribusi [6]. Selain itu, gardu induk menurut pemasangannya dibagi menjadi dua yaitu gardu induk konvensional dan GIS (*Gas Insulated Station*).

#### **2.3.1.1 Gardu Induk Konvensional**

Gardu induk konvensional merupakan jenis gardu induk yang pemasangan peralatan-peralatannya berada di ruang terbuka dan membutuhkan area yang luas, namun tidak semua peralatan diletakkan di luar, terdapat beberapa peralatan seperti sistem proteksi, sistem kendali, dan beberapa komponen lainnya yang diletakkan di dalam ruangan [6].



**Gambar 2.2** Gardu Induk Konvensional

Sistem gardu induk di Indonesia biasanya menggunakan gardu induk konvensional seperti pada gambar 2.2, dapat dilihat bahwa peralatan listrik yang ada pada gardu induk tersebut berada di area terbuka. Di Indonesia kebanyakan gardu induk transmisi dan distribusi merupakan tipe gardu induk konvensional.

#### **2.3.1.2 Gas Insulated Station (GIS)**

Gas Insulated Station merupakan gardu induk yang hampir semua komponennya seperti switchgear, busbar, isolator, peralatan sistem pengamanan, peralatan sistem kontrol, dan panel-panel diletakkan di dalam ruangan, kecuali transformator daya yang sering dijumpai berada di luar ruangan. Gardu induk tipe GIS ini kebanyakan digunakan pada

pemukiman kota dengan jumlah penduduk yang padat. Hal tersebut memungkinkan pemasangan GIS ini membutuhkan area yang tidak terlalu luas [6]. GIS juga merupakan gardu induk yang berfungsi menurunkan tegangan dari sistem jaringan transmisi dan menyalurkan tenaga listrik melalui jaringan distribusi kepada konsumen. Pada GIS terjadi penurunan level tegangan dari 150 kV hingga menjadi 20 kV.

### **2.3.2 Jaringan Distribusi Primer**

Jaringan distribusi primer adalah bagian awal penyaluran tenaga listrik dari pusat pembangkit tenaga listrik kepada pusat beban pada sistem penyaluran tenaga listrik langsung. Jaringan distribusi primer atau jaringan distribusi tegangan tinggi (JDTT) memiliki level tegangan sistem sebesar 20 kV. Level tegangan di atas 20 kV tidak dianjurkan untuk wilayah perkotaan, karena memungkinkan terjadi gejala-gejala korona yang dapat mengganggu frekuensi radio, TV, maupun telekomunikasi [7].

### **2.3.3 Gardu Pembagi**

Gardu pembagi merupakan bagian dari penyaluran tenaga listrik yang berfungsi merubah level tegangan listrik dari jaringan distribusi primer menjadi level tegangan terpakai yang digunakan untuk konsumen [7].

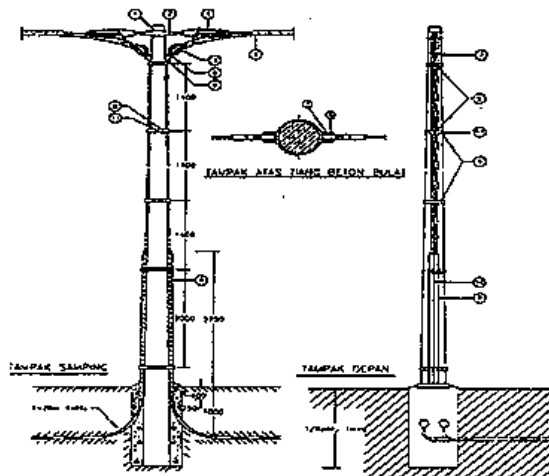


**Gambar 2.3** Gardu Pembagi Jenis Tiang

Kapasitas transformator yang digunakan pada gardu pembagi ini bergantung pada total beban yang akan dilayani dan luas daerah pelayanan beban. Transformator yang digunakan pada gardu pembagi bisa berupa transformator satu fasa maupun transformator tiga fasa.

#### 2.3.4 Jaringan Distribusi Sekunder

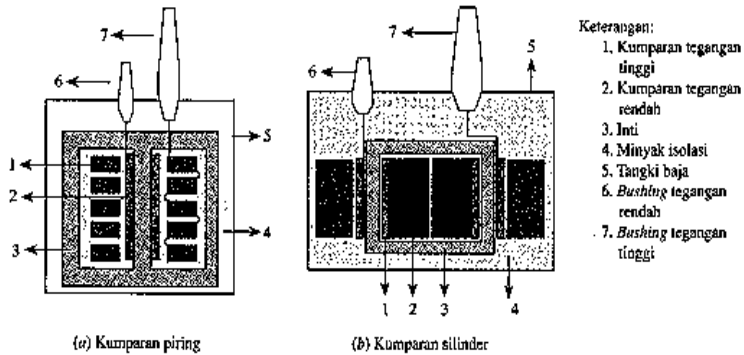
Jaringan distribusi sekunder atau jaringan distribusi tegangan rendah (JDTR) adalah sistem jaringan distribusi yang langsung berhubungan dengan konsumen [7]. Level tegangan yang digunakan pada jaringan distribusi sekunder ini sebesar 400/230 V. Tegangan 400 V merupakan tegangan antara fasa dengan fasa, sedangkan tegangan 230 V merupakan tegangan antara fasa dengan netral.



Gambar 2.4 Jaringan Distribusi Sekunder 400/230 V.

#### 2.4 Transformator Daya

Transformator daya memiliki peranan yang begitu penting dalam sistem tenaga listrik. Pada sistem jaringan transmisi, penaikan tegangan oleh transformator daya harus dilakukan agar rugi-rugi daya tidak melebihi rugi-rugi yang diinginkan. Selain itu untuk menyalurkan daya dari sistem jaringan transmisi ke sistem jaringan distribusi perlu dilakukan penurunan tegangan oleh transformator daya sebelum akhirnya disalurkan kepada konsumen [1].



**Gambar 2.5** Konstruksi Umum Transformator Daya [1]

### 2.4.1 Prinsip Kerja Transformator Daya

Sebuah transformator memiliki bagian utama seperti inti, dua set atau lebih kumparan, dan isolasi. Biasanya inti transformator terbuat dari lembaran-lembaran baja silikon. kumparannya terbuat dari bahan tembaga, dan terdapat isolasi dari kombinasi bahan dielektrik cair ataupun padat. Kumparan transformator yang terhubung oleh sumber energi disebut sebagai kumparan primer, sedangkan kumparan transformator yang terhubung oleh beban disebut kumparan sekunder.

Apabila kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik, namun kumparan sekunder dalam keadaan tidak dibebani, maka pada kumparan primer akan teraliri arus beban nol ( $I_0$ ). Arus beban nol akan membangkitkan fluks bolak-balik pada inti. Adanya fluks bolak-balik ini akan melingkupi kumparan primer dan kumparan sekunder, sehingga pada kedua kumparan timbul suatu gaya gerak listrik sebesar :

$$E_1 = 4,44 f N_1 \phi \text{ (volt)} \quad (2.3)$$

$$E_2 = 4,44 f N_2 \phi \text{ (volt)} \quad (2.4)$$

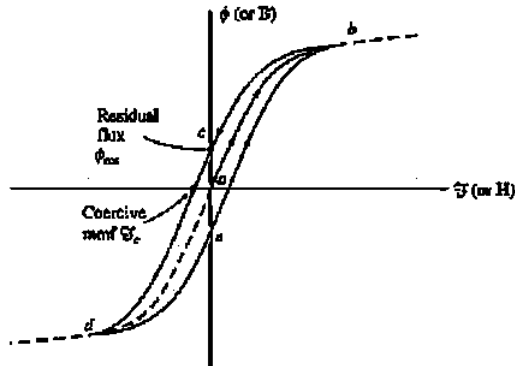
Keterangan :

- $E_1$  = Gaya Gerak Listrik pada kumparan primer (V)
- $E_2$  = Gaya Gerak Listrik pada kumparan sekunder (V)
- $f$  = Frekuensi tegangan sumber (Hz)
- $N_1$  = Jumlah belitan kumparan primer
- $N_2$  = Jumlah belitan kumparan sekunder
- $\phi$  = Fluks magnetic pada inti (Weber)

Akibat adanya fluks di kumparan primer, maka kumparan primer akan terjadi induksi (*self induction*) dan hal tersebut terjadi pula pada kumparan sekunder karena pengaruh induksi dari kumparan primer atau disebut sebagai induksi bersama (*mutual induction*) yang kan menyebabkan munculnya fluks magnet pada kumparan sekunder [5]. Apabila kumparan sekunder terbebani, maka pada kumparan tersebut akan teraliri arus sekunder ( $I_2$ ). Arus ini akan menimbulkan fluks pada inti transformator yang berlawanan dengan fluks yang ditimbulkan oleh arus beban nol ( $I_0$ ). Dengan kata lain, arus sekunder menimbulkan demagnetisasi pada inti transformator.

#### 2.4.2 Kurva Histerisis Transformator

Kurva histerisis transformator merupakan kurva yang menunjukkan bahwa terdapat ketidaklinearan pada inti transformator. Seperti pada Gambar 2.6 berikut, kurva histerisis merupakan representasi dari karakteristik magnetisasi inti transformator yang ditunjukkan oleh perbandingan antara kerapatan fluks magnet ( $B$ ) dengan kuat medan magnet ( $H$ ) [3].



Gambar 2.6 Kurva Histerisis

Dapat dilihat dari kurva tersebut, bahwa rentang a sampai b merupakan kondisi awal transformator ketika diberi suplai. Kerapatan fluks akan beranjak naik hingga mencapai titik saturasinya ( $B_s$ ). Saat nilai arus menurun maka nilai kerapatan fluks akan menurun juga namun tidak kembali mengikuti jalur awal, melainkan melalui jalur b-c-d yang diakibatkan oleh adanya fluks sisa pada inti transformator. Saat nilai arus naik maka nilai kerapatan fluks akan menaik namun melalui jalur d-e-b,



hal tersebut juga merupakan akibat dari adanya fluks sisa pada inti transformator. Fluks sisa pada inti transformator dipengaruhi oleh permeabilitas inti transformator, sedangkan permeabilitas inti transformator dipengaruhi oleh bahan material dari inti transformator itu sendiri. Semakin baik bahan material inti transformator maka kurva histerisis akan semakin rapat atau cenderung linear [6].

## 2.4.3 Hubungan Transformator Tiga Fasa

### 2.4.3.1 Hubungan Bintang (Y)

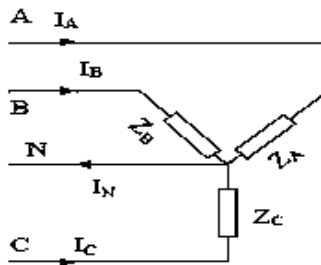
Hubungan bintang pada transformator tiga fasa memiliki ujung-ujung awal atau akhir lilitannya yang disatukan. Titik penyatuan dari ujung-ujung lilitan ini merupakan titik netral. Arus transformator tiga fasa dengan kumparan yang dihubungkan bintang memiliki perbedaan sudut sebesar  $120^\circ$ . Arus dan tegangan yang diperoleh dari transformator tiga fasa hubungan bintang sebagai berikut :

$$I_A = I_B = I_C = I_L \quad (2.5)$$

$$I_L = I_{ph} \quad (2.6)$$

$$V_{AB} = V_{BC} = V_{CA} = V_{L-L} \quad (2.7)$$

$$V_{L-L} = \sqrt{3}V_{ph} \quad (2.8)$$



**Gambar 2.7** Transformator Tiga Fasa Hubungan Bintang [5]

### 2.4.3.2 Hubungan Segitiga / Delta ( $\Delta$ )

Hubungan segitiga pada transformator tiga fasa memiliki penyambungan dengan ujung akhir lilitan fasa pertama disambung dengan ujung awal lilitan fasa kedua, ujung akhir lilitan fasa kedua disambung dengan ujung awal lilitan fasa ketiga, dan ujung akhir lilitan fasa ketiga disambung dengan ujung awal lilitan fasa pertama. Penyambungan ini akan memiliki bentuk segitiga. Tegangan

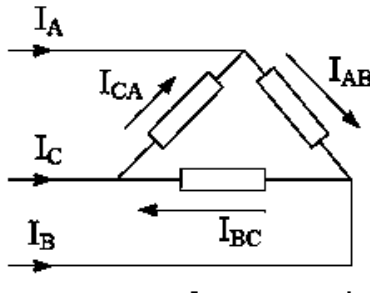
transformator tiga fasa dengan kumparan yang dihubungkan segitiga memiliki perbedaan sudut sebesar  $120^\circ$ . Arus dan tegangan yang diperoleh dari transformator tiga fasa hubungan segitiga sebagai berikut :

$$I_A = I_B = I_C = I_L \quad (2.9)$$

$$I_L = \sqrt{3}I_{ph} \quad (2.10)$$

$$V_{AB} = V_{BC} = V_{CA} = V_{L-L} \quad (2.11)$$

$$V_{L-L} = V_{ph} \quad (2.12)$$



**Gambar 2.8** Transformator Tiga Fasa Hubungan Segitiga [5]

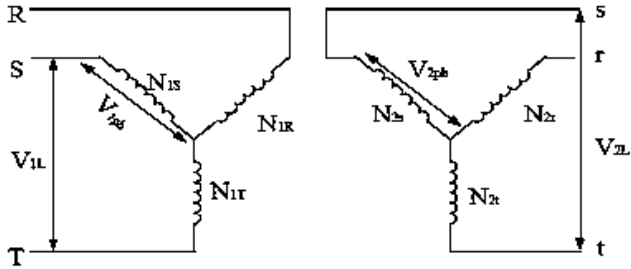
#### 2.4.4 Jenis-jenis Konfigurasi Belitan Transformator Daya Tiga Fasa

Pada transformator tiga fasa, tiga buah lilitan fasa pada sisi primer dan sisi sekunder dapat dihubungkan dalam bermacam-macam jenis hubungan, hal ini yang dinamakan konfigurasi belitan transformator tiga fasa. Kombinasi dari kedua sisi kumparan ini dapat bermacam-macam, seperti bintang-bintang, bintang-segitiga, segitiga-bintang, dan segitiga-segitiga [5].

##### 2.4.4.1 Hubungan Bintang-Bintang (Y-Y)

Transformator hubungan ini memiliki rasio tegangan fasa-fasa (L-L) pada primer dan sekunder adalah sama dengan rasio setiap transformator dengan pergeseran fasa sebesar  $30^\circ$  antara fasa-netral (L-N) dan tegangan fasa-fasa (L-L) pada sisi primer dan sekundernya. Adapun perbandingan tegangan primer dengan tegangan sekunder pada transformator hubungan ini yaitu :

$$\frac{V_{Lp}}{V_{Ls}} = \frac{\sqrt{3}V_{ph p}}{\sqrt{3}V_{ph s}} \quad (2.13)$$

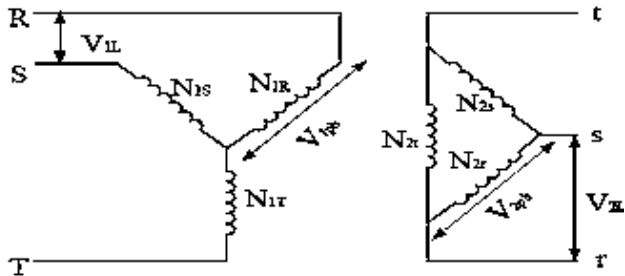


**Gambar 2.9** Transformator Tiga Fasa Hubungan Y-Y [5]

#### 2.4.4.2 Hubungan Bintang-Segitiga (Y-Δ)

Transformator hubungan ini memiliki rasio tegangan fasa-fasa antara sekunder dan primer sebesar  $1/\sqrt{3}$  kali rasio setiap transformator dengan sudut antara tegangan fasa-fasa antara primer dan sekunder sebesar  $30^\circ$ . Adapun perbandingan tegangan primer dengan tegangan sekunder pada transformator hubungan ini yaitu :

$$\frac{VLp}{VLS} = \frac{\sqrt{3}Vph p}{Vph s} \quad (2.14)$$

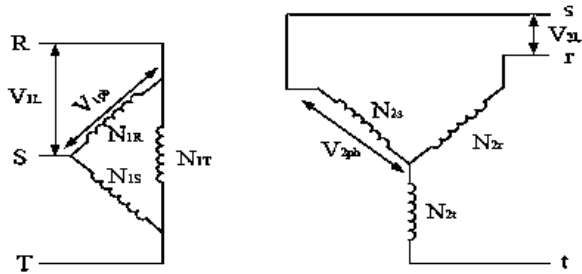


**Gambar 2.10** Transformator Tiga Fasa Hubungan Y-Δ [5]

#### 2.4.4.3 Hubungan Segitiga-Bintang (Δ-Y)

Transformator hubungan ini biasa digunakan untuk menurunkan tegangan dari tegangan transmisi ke tegangan rendah. Adapun perbandingan tegangan primer dengan tegangan sekunder pada transformator hubungan ini yaitu :

$$\frac{VLp}{VLS} = \frac{Vph p}{\sqrt{3}Vph s} \quad (2.15)$$

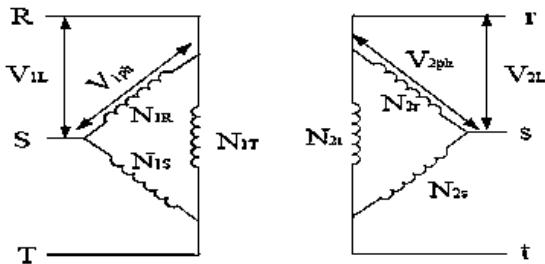


**Gambar 2.11** Transformator Tiga Fasa Hubungan  $\Delta$ -Y [5]

#### 2.4.4.4 Hubungan Segitiga-Segitiga ( $\Delta$ - $\Delta$ )

Transformator hubungan ini memiliki tegangan fasa-fasa yang sama untuk sisi primer dan sekundernya. Adapun perbandingan tegangan primer dengan tegangan sekunder pada transformator hubungan ini yaitu:

$$\frac{VLp}{VLS} = \frac{Vph p}{Vph s} \quad (2.16)$$



**Gambar 2.12** Transformator Tiga Fasa Hubungan  $\Delta$ - $\Delta$  [5]

## **BAB 3**

### **FERORESONANSI DI SISTEM TENAGA LISTRIK**

Kemajuan teknologi yang terjadi sekarang ini menuntut integritas serta kontinuitas sistem tenaga listrik yang baik dan andal. Sistem tenaga listrik merupakan sistem yang rumit karena terdiri dari banyak komponen elektrik, mekanik, serta sistem kontrol di dalamnya. Namun, meskipun telah digunakan teknologi yang paling baik pada sistem tenaga listrik, hal tersebut tidak menutup kemungkinan menyebabkan munculnya gangguan yang mungkin terjadi pada sistem tenaga listrik. Gangguan yang sering kali muncul pada sistem tenaga listrik diakibatkan oleh faktor internal sistem seperti adanya penutupan atau pembukaan kontak (*Switching ON/OFF*), dilakukan energisasi dan re-energisasi peralatan untuk keperluan pemeliharaan, serta diakibatkan oleh faktor eksternal sistem seperti tersambar petir pada saluran sistem. Faktor-faktor tersebutlah yang mengakibatkan sistem tenaga listrik tidak selalu bekerja pada kondisi normal, namun pada suatu ketika akibat dari faktor-faktor tersebut yang menyebabkan sistem akan bekerja pada kondisi transien (sesaat).

Kondisi transien yang terjadi pada sistem tenaga listrik tidak hanya dipengaruhi oleh faktor-faktor yang telah disebutkan. Terdapat beberapa parameter lain seperti pengaruh kapasitansi saluran, induktansi nonlinear dari inti peralatan transformator, dan sebagainya. Peristiwa transien yang terjadi pada sistem tenaga listrik tersebut sering dikenal dengan istilah feroresonansi.

#### **3.1 Resonansi**

Suatu rangkaian listrik umumnya mengandung unsur resistif (R), kapasitif (C), dan induktif (L). Timbul suatu gejala kelistrikan yang diakibatkan oleh unsur-unsur tersebut yang biasa disebut dengan resonansi. Resonansi merupakan sebuah fenomena yang dapat bersifat mengganggu bagi peralatan listrik yang tersambung pada suatu rangkaian listrik. Klasifikasi resonansi dibagi menjadi dua tipe, yaitu resonansi seri dan resonansi parallel. Resonansi seri adalah suatu rangkaian listrik yang mengandung komponen induktor dan kapasitor yang tersusun secara seri. Dengan frekuensi sumber diubah-ubah, maka akan muncul resonansi dengan nilai reaktansi induktif dan reaktansi kapasitif yang sama.

$$X_L = X_C \quad (3.1)$$

Keterangan :  $X_L$  = Reaktansi Induktif  
 $X_C$  = Reaktansi Kapasitif

Maka syarat terjadinya sebuah resonansi seperti persamaan berikut :

$$LC\omega_n^2 = 1 \quad (3.2)$$

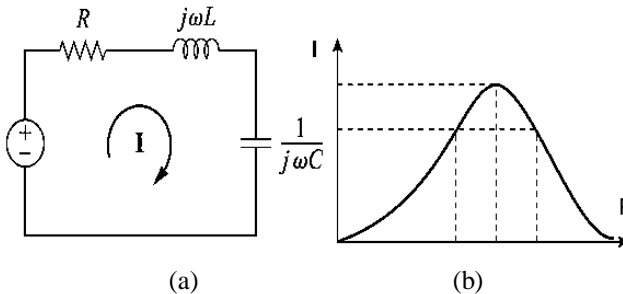
Keterangan :  $L$  = Induktor (Henry)  
 $C$  = Kapasitor (Farad)  
 $\omega_n$  = Kecepatan Sudut (Rad/s)

Sehingga apabila resonansi terjadi, maka nilai reaktansi akan menjadi nol, nilai impedansi rangkaian listriknya akan mencapai nilai minimumnya (murni resistif) seperti persamaan :

$$Z = R \quad (3.3)$$

Keterangan :  $Z$  = Impedansi  
 $R$  = Resistansi  
 $X$  = Reaktansi

Gambar 3.1 merupakan rangkaian sederhana resonansi seri dengan kurva arus terhadap frekuensi resonansinya. Apabila nilai impedansi mencapai minimumnya, maka nilai arus ( $I$ ) suatu rangkaian listrik akan mencapai nilai maksimum. Oleh karena itu, adanya resonansi menandakan suatu gangguan pada sistem tenaga listrik.



**Gambar 3.1** Resonansi Seri. (a) Rangkaian Sederhana Resonansi Seri;  
 (b) Kurva hubungan Arus dengan Frekuensi Resonansi

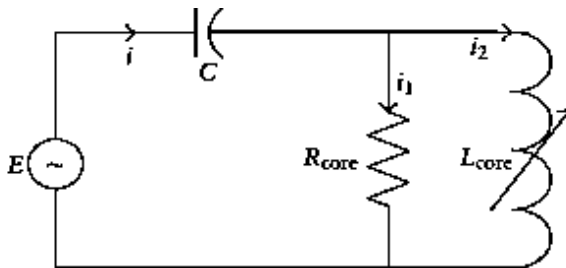
### 3.2 Ferroresonansi

Ferroresonansi adalah fenomena kelistrikan yang memadukan antara beberapa hal yaitu nilai kapasitansi ( $C$ ) yang didapat dari kabel,

nilai induktansi magnetisasi non-linear ( $L$ ) yang didapat dari transformator, dan adanya pemicu sesaat seperti *switching* [3]. Perpaduan di antara hal-hal tersebut akan mungkin terjadi pada suatu kondisi tertentu dengan nilai frekuensi tertentu sehingga akan menyebabkan adanya pergetaran osilasi pada gelombang tegangannya. Osilasi pada gelombang tegangan yang tinggi ini merupakan sebuah gangguan yang harus diredam, karena gangguan ini dapat menjadi salah satu faktor yang mengakibatkan rusaknya peralatan listrik yang tersambung pada suatu sistem tenaga listrik, karena tegangan yang tersalurkan dapat melebihi tegangan rating dari peralatan tersebut [4].

### 3.2.1 Munculnya Feroresonansi

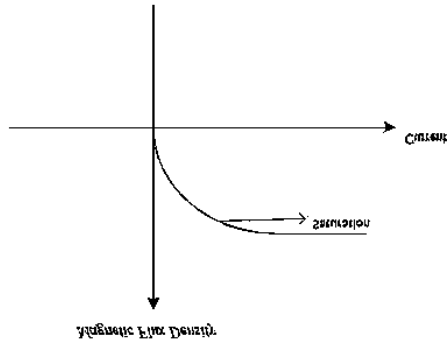
Untuk mengetahui munculnya feroresonansi, dibuat rangkaian resonansi seri dengan menggunakan kapasitor sebagai pemodelan dari sistem saluran tenaga listrik dan induktor nonlinear serta resistor sebagai pemodelan dari inti transformator. Gambar rangkaian feroresonansi dapat dilihat pada Gambar 3.2.



**Gambar 3.2** Rangkaian Feroresonansi

Sama seperti resonansi yang terjadi pada rangkaian resonansi seri, ketika rangkaian feroresonansi mengalami peristiwa resonansi, maka nilai impedansi akan mengecil yang mengakibatkan nilai arus membesar. Peningkatan nilai arus ini menyebabkan kerapatan fluks menjadi naik hingga mencapai saturasi, sehingga tidak lagi menjadi linear seperti pada gambar 3.3. Pada inti transformator yang bersifat feromagnetik, apabila nilai arusnya membesar melalui titik saturasinya maka nilai induktansi dari inti transformator akan berubah dengan cepat hingga menjadi non-linear. Sehingga apabila terjadi interaksi antara nilai kapasitansi rangkaian dan nilai induktansi inti transformator, maka dapat menghasilkan nilai tegangan dan arus yang tidak biasa. Nilai tegangan

dan arus yang muncul akibat feroresonansi ini dapat bersifat berbahaya bagi peralatan-peralatan yang terhubung pada sistem tersebut.



**Gambar 3.3** Kurva Saturasi Induktansi Non-linear

Feroresonansi yang muncul pada sistem tenaga listrik ditandai oleh beberapa respon steady state pada suatu parameter jaringan yang sama. Perubahan respon yang berubah secara tiba-tiba ditandai dengan adanya level harmonisa dan tegangan lebih pada respon tegangan yang tersalurkan, sehingga bersifat berbahaya dan dapat mengakibatkan kerusakan pada peralatan listrik.

Adapun gejala kelistrikan yang menunjukkan timbulnya feroresonansi pada suatu sistem tenaga listrik dapat diketahui dari beberapa hal berikut:

- A. Penyimpangan yang besar untuk nilai tegangan lebih dan arus lebih
- B. Munculnya frekuensi-frekuensi harmonisa
- C. Pemanasan berlebih dan suara bising pada transformator
- D. Kerusakan pada peralatan listrik

Gejala-gejala tersebut mungkin terjadi pada sistem kelistrikan akibat gangguan-gangguan seperti *lightning overvoltage* atau petir, operasi *switching*, dan gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah [3].

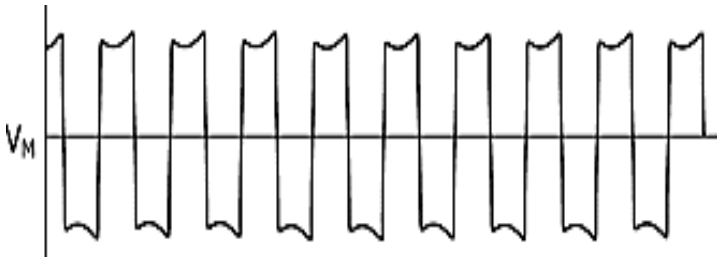
### 3.2.2 Klasifikasi Feroresonansi

#### a. Fundamental Mode

Fundamental mode merupakan tipe feroresonansi yang tegangan dan arusnya memiliki periode yang sama dengan periode sistem dan memiliki spectrum sinyal yang terdiri frekuensi fundamental ( $f_0$ ) sistem



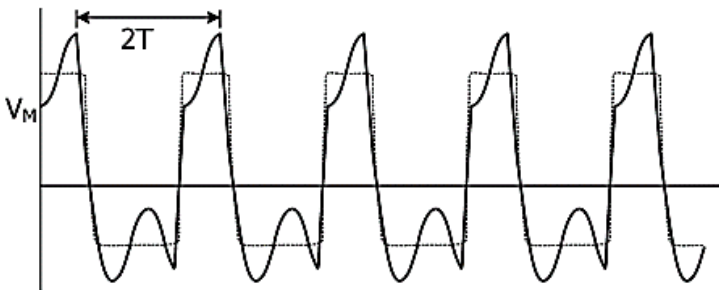
yang diikuti oleh beberapa macam frekuensi harmonisa ( $3f_0$ ,  $5f_0$ ,  $nf_0$ ). Bentuk gelombang mode ini dapat dilihat pada gambar 3.3 berikut.



**Gambar 3.4** Fundamental Mode [3]

#### b. Subharmonic Mode

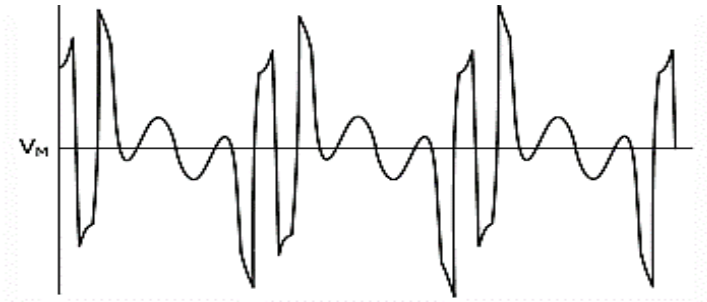
Subharmonic Mode merupakan tipe feroresonansi dengan sinyal output memiliki periode  $nT$  dari kelipatan periode sinyal sumber, biasanya berkelipatan ganjil. Kondisi seperti ini disebut dengan Subharmonic  $n$  atau Harmonic  $1/n$ , sehingga didapatkan persamaan fundamental  $f_0/n$ , dimana  $f_0$  adalah frekuensi fundamental dan  $n$  adalah sebuah integer. Bentuk gelombang mode ini dapat dilihat pada gambar 3.4 berikut.



**Gambar 3.5** Subharmonic Mode [3]

#### c. Quasi-periodic Mode

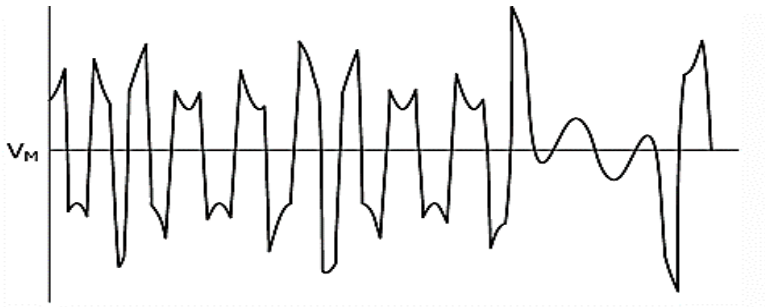
Quasi-periodic Mode merupakan tipe feroresonansi dengan sinyal keluarannya tidak periodik. Spektrum sinyal yang dihasilkan bersifat diskontinyu dengan frekuensi  $nf_1 + mf_2$ , dengan  $f_1$  dan  $f_2$  merupakan nilai riil irasional serta  $n$  dan  $m$  merupakan integer. Bentuk gelombang mode ini dapat dilihat pada gambar 3.5 berikut.



**Gambar 3.6** Quasi-periodic Mode [3]

#### **d. Chaotic Mode**

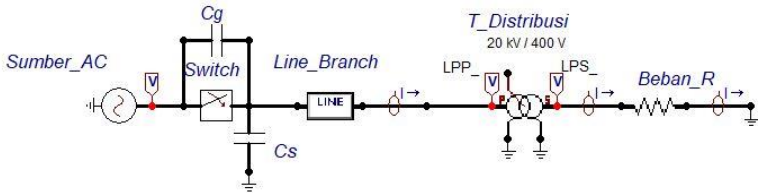
Chaotic Mode merupakan tipe feroresonansi yang memiliki spectrum sinyal bersifat non-periodik dan kontinu. Sinyal keluaran ini tidak dapat diinterupsi oleh frekuensi lain dan memiliki bentuk yang tidak teratur. Bentuk gelombang mode ini dapat dilihat pada gambar 3.6 berikut.



**Gambar 3.7** Chaotic Mode [3]

### **3.3 Simulasi Feroresonansi pada Sistem Tenaga Listrik**

Feroresonansi pada sistem tenaga listrik sangat sulit untuk diprediksi kemunculannya. Pada studi ini, feroresonansi yang terjadi di sistem tenaga listrik dapat dimengerti dengan menggunakan sebuah model rangkaian simulasi. Rangkaian yang digunakan berupa sistem distribusi tiga fasa dengan frekuensi sistem 50 Hz dan level tegangan sebesar 20 kV serta menggunakan transformator distribusi 20 kV / 400 V sebagai objek utama penelitian. Pemodelan rangkaian feroresonansi yang dilakukan menggunakan produk perangkat lunak *ATPDraw*.



**Gambar 3.8** Simulasi Rangkaian Ferroresonansi

Pada pemodelan rangkaian ferroresonansi tersebut terdiri dari beberapa parameter yang dapat menimbulkan ferroresonansi pada suatu kasus tertentu. Transformator distribusi digunakan sebagai elemen induktif non-linear dan komponen *Line Branch* sebagai elemen resistif dan kapasitif yang diperoleh dari saluran kabel distribusi. Selain itu model beban yang digunakan resistor sebagai beban resistif. Parameter gangguan yang dipelajari dalam studi ini berupa operasi *switching* oleh Circuit Breaker (CB).

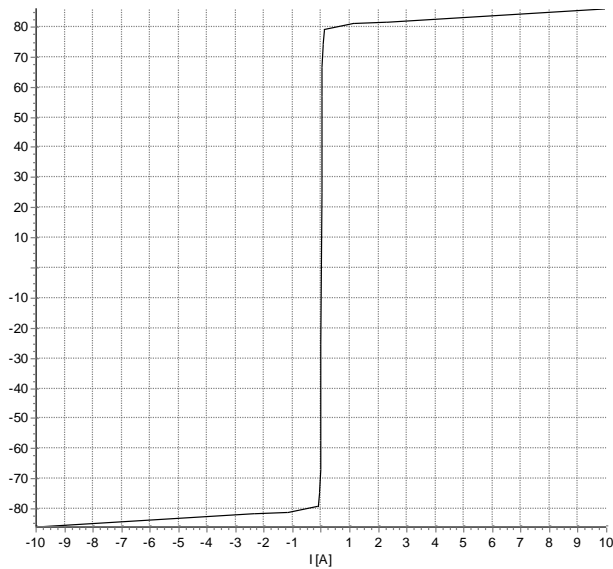
### 3.3.1 Pemodelan Transformator Distribusi

Pada studi ini, pemodelan transformator distribusi yang digunakan berupa transformator penurun tegangan (*Step-Down*) tiga fasa dengan rating tegangan sebesar 20 kV / 400 V. Parameter transformator distribusi yang digunakan pada studi ini diambil dari referensi yang ada sebagai berikut.

**Tabel 3.1** Parameter Transformator Distribusi [6]

| Parameter                     | Nilai                            |
|-------------------------------|----------------------------------|
| Tegangan ( $V_p / V_s$ )      | 20 / 0,4 kV ( <i>Step-Down</i> ) |
| Resistansi Primer ( $R_p$ )   | 5 $\Omega$                       |
| Induktansi Primer ( $L_p$ )   | 0,63662 mH                       |
| Resistansi Sekunder ( $R_s$ ) | 0,01805 $\Omega$                 |
| Induktansi Sekunder ( $R_s$ ) | 0,0082982 mH                     |
| $R_{magnetisasi}$ ( $R_m$ )   | 1500000 $\Omega$                 |

Selain parameter-parameter transformator distribusi yang dipakai pada tabel di atas, diperlukan parameter induktansi non-linear yang menunjukkan karakteristik dari inti transformator distribusi, parameter tersebut ditunjukkan dengan kurva magnetisasi seperti pada gambar 3.8.



**Gambar 3.9** Kurva Karakteristik Magnetisasi Transformator Distribusi

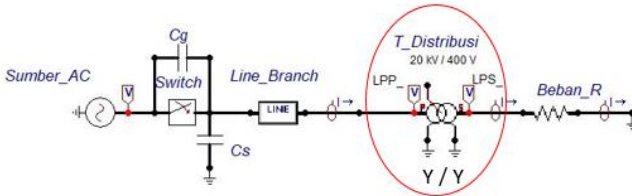
### 3.3.2 Konfigurasi Belitan Transformator Distribusi

Feroresonansi pada sistem tenaga listrik dapat membahayakan bagi peralatan-peralatan listrik yang terhubung pada sistem tersebut, tanpa terkecuali transformator itu sendiri. Feroresonansi memiliki efek yang lebih merusak pada peralatan listrik seperti transformator pada sistem jaringan distribusi [2]. Terdapat beberapa faktor utama yang dapat menyebabkan munculnya feroresonansi, salah satunya adalah hubungan konfigurasi belitan transformator tersebut. Pada studi ini, akan diteliti pengaruh dari beberapa hubungan konfigurasi belitan transformator yang umum digunakan terhadap fenomena feroresonansi, yaitu transformator distribusi terhubung Bintang-Bintang (Y-Y), Bintang-Segitiga (Y- $\Delta$ ), Segitiga-Bintang ( $\Delta$ -Y), dan Segitiga-Segitiga ( $\Delta$ - $\Delta$ ).

#### 3.3.2.1 Transformator Distribusi Terhubung Bintang-Bintang (Y-Y)

Transformator distribusi ini memiliki konfigurasi belitan terhubung bintang pada sisi primer dan terhubung bintang pada sisi

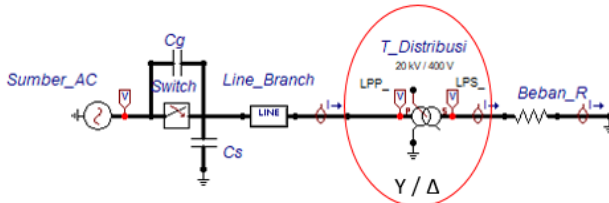
sekunder. Rangkaian simulasi feroresonansi dengan transformator distribusi jenis ini dapat dilihat pada gambar 3.9.



**Gambar 3.10** Simulasi Feroresonansi dengan Transformator Distribusi Terhubung Bintang-Bintang.

### 3.3.2.2 Transformator Distribusi Terhubung Bintang-Segitiga (Y- $\Delta$ )

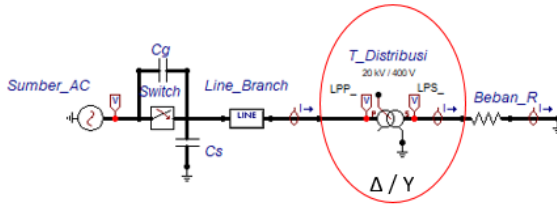
Transformator distribusi ini memiliki konfigurasi belitan terhubung bintang pada sisi primer dan terhubung segitiga pada sisi sekunder. Rangkaian simulasi feroresonansi dengan transformator distribusi jenis ini dapat dilihat pada gambar 3.10.



**Gambar 3.11** Simulasi Feroresonansi dengan Transformator Distribusi Terhubung Bintang-Segitiga.

### 3.3.2.3 Transformator Distribusi Terhubung Bintang-Segitiga ( $\Delta$ -Y)

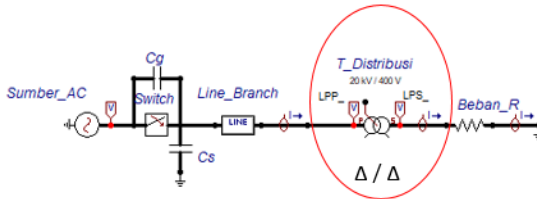
Transformator distribusi ini memiliki konfigurasi belitan terhubung segitiga pada sisi primer dan terhubung bintang pada sisi sekunder. Rangkaian simulasi feroresonansi dengan transformator distribusi jenis ini dapat dilihat pada gambar 3.11.



**Gambar 3.12** Simulasi Feroresonansi dengan Transformator Distribusi Terhubung Segitiga-Bintang.

### 3.3.2.4 Transformator Distribusi Terhubung Segitiga-Segitiga ( $\Delta$ - $\Delta$ )

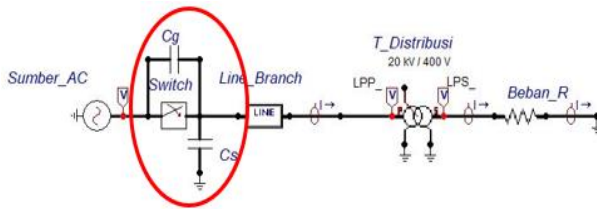
Transformator distribusi ini memiliki konfigurasi belitan terhubung segitiga pada sisi primer dan terhubung segitiga pada sisi sekunder. Rangkaian simulasi feroresonansi dengan transformator distribusi jenis ini dapat dilihat pada gambar 3.12.



**Gambar 3.13** Simulasi Feroresonansi dengan Transformator Distribusi Terhubung Segitiga-Segitiga.

### 3.3.3 Rangkaian Feroresonansi Akibat Gangguan Operasi *Switching*

Pada sistem tenaga listrik, fenomena feroresonansi dapat muncul akibat adanya gangguan sistem secara internal maupun eksternal. Salah satu gangguan internal pada sistem tenaga listrik di antaranya adalah operasi *unbalance switching* terhadap fasa-fasa sistem akibat terjadinya pemutusan daya oleh *Circuit Breaker* (CB) [4]. Pada studi ini digunakan beberapa keadaan operasi *switching* sebagai metode pengambilan datanya.



**Gambar 3.14** Rangkaian Simulasi Feroresonansi Akibat Operasi *Switching*

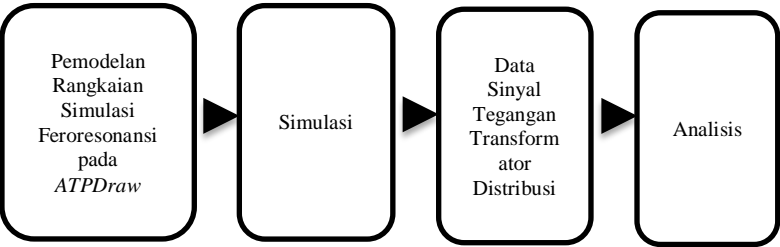
Pada rangkaian simulasi feroresonansi seperti gambar 3.13, digunakan *Time-Controlled Switch* sebagai representasi dari CB dengan kondisi awal *switch* dalam keadaan tertutup. Terdapat tiga keadaan operasi *switching* yang akan dilakukan yaitu operasi *switching* sistem terbuka satu fasa, operasi *switching* sistem terbuka dua fasa, dan operasi *switching* sistem terbuka tiga fasa. *Switching* pada fasa tersebut dilakukan pada detik ke 0,15 dengan percobaan simulasi dijalankan dalam waktu 0,8 detik. Selain itu, terdapat nilai kapasitansi yang muncul akibat adanya pemutusan daya oleh CB yaitu kapasitansi *grading* ( $C_g$ ) dan kapasitansi *shunt* ( $C_s$ ) yang besarnya yaitu 0,0046  $\mu\text{F}$  dan 0,000075  $\mu\text{F}$ .

### 3.4 Pengambilan Data dan Pengolahan Data

Pada studi ini, pemodelan rangkaian feroresonansi disimulasikan pada perangkat lunak *ATPDraw*. Rangkaian simulasi feroresonansi dijalankan dalam waktu 0,8 detik dengan waktu variabel step 1  $\mu$  detik. Gangguan yang diberikan yaitu berupa operasi *switching* pada detik ke 0,15 dengan menggunakan tiga kondisi yaitu operasi *switching* sistem terbuka satu fasa, operasi *switching* sistem terbuka dua fasa, dan operasi *switching* sistem terbuka tiga fasa. Pemodelan rangkaian simulasi feroresonansi yang diteliti yaitu menggunakan transformator distribusi dengan empat macam hubungan konfigurasi belitan yaitu transformator terhubung bintang-bintang, transformator terhubung bintang-segitiga, transformator terhubung segitiga-bintang, dan transformator terhubung segitiga-segitiga. Dengan membuat pemodelan rangkaian simulasi feroresonansi tersebut, maka didapatkan data setelah menjalankan simulasi untuk tiap kondisi. Data yang diambil adalah berupa nilai serta respon gelombang tegangan pada sisi primer dan sisi sekunder transformator distribusi untuk setiap kondisi operasi *switching*.

Dari data yang telah diperoleh dilakukan analisis dengan membandingkan nilai dan respon gelombang tegangan dari masing-

masing hubungan konfigurasi belitan transformator distribusi terhadap feroresonansi yang muncul akibat gangguan operasi *switching* yang diberikan.



**Gambar 3.15** *Flowchart* Proses Pengambilan Data dan Pengolahan Data

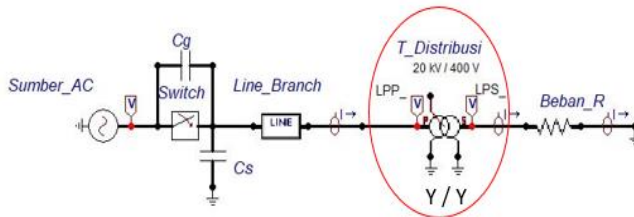


## BAB 4

### ANALISIS HASIL SIMULASI FERORESONANSI PADA EMPAT MACAM KONFIGURASI BELITAN TRANSFORMATOR DISTRIBUSI

#### 4.1 Simulasi Rangkaian Feroresonansi dengan Transformator Distribusi Terhubung Bintang-Bintang (Y-Y)

Pada simulasi rangkaian feroresonansi ini digunakan transformator distribusi dengan konfigurasi belitan terhubung bintang pada sisi primer dan terhubung bintang pada sisi sekunder. Simulasi rangkaian feroresonansi ini dapat dilihat pada gambar 4.1.



**Gambar 4.1** Simulasi Feroresonansi dengan Transformator Distribusi Terhubung Bintang-Bintang.

##### 4.1.1 Kondisi Normal

Pada kondisi normal, hasil pengukuran tegangan puncak *line-netral* ( $V_{peak\ L-N}$ ) pada sisi primer transformator distribusi sebesar 16,35 kV, sedangkan pada sisi sekunder transformator distribusi didapatkan tegangan puncak *line-netral* ( $V_{peak\ L-N}$ ) sebesar 0,326 kV. Plot respon tegangan puncak pada sisi primer dan sisi sekunder dapat dilihat pada gambar 4.2. Secara perhitungan tegangan di kondisi normal dapat dicari dengan menggunakan persamaan :

$$V_{L-Nrms} = \frac{V_{L-Lrms}}{\sqrt{3}} \quad (4.1)$$

Sisi Primer :  $V_{L-Nrms} = \frac{20000\ V}{\sqrt{3}} = 11,55\ kV$

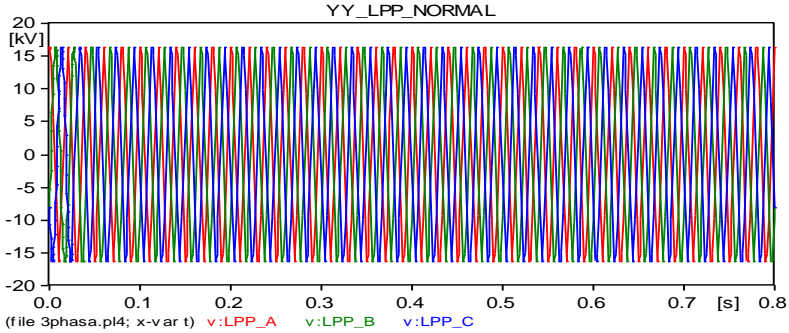
Sisi Sekunder :  $V_{L-Nrms} = \frac{400\ V}{\sqrt{3}} = 230,94\ V$

Sehingga tegangan puncak *line-netral* ( $V_{peak\ L-N}$ ) dapat dihitung dengan persamaan :

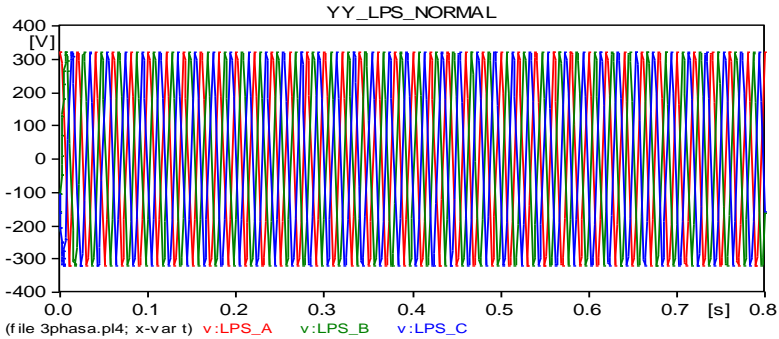
$$V_{L-Npeak} = V_{L-Nrms} \times \sqrt{2} \quad (4.2)$$

$$\text{Sisi Primer : } V_{L-Npeak} = 11,55 \times \sqrt{2} = 16,33 \text{ kV}$$

$$\text{Sisi Sekunder : } V_{L-Npeak} = 230,94 \times \sqrt{2} = 326,59 \text{ V}$$



(a)



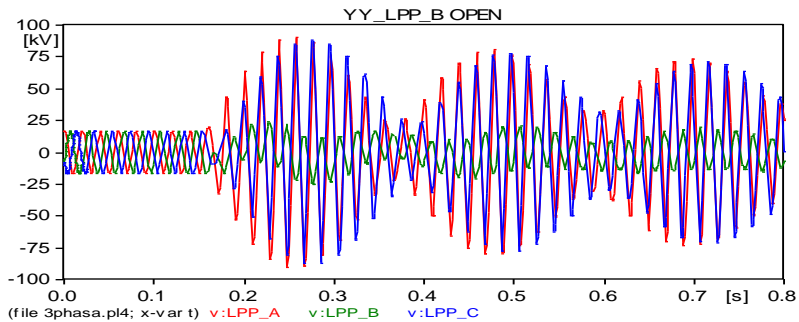
(b)

**Gambar 4.2** Respon Tegangan Transformator Distribusi Terhubung Bintang-Bintang dalam Kondisi Normal, (a) Sisi Primer Fasa R,S, dan T ; (b) Sisi Sekunder Fasa R, S, dan T.

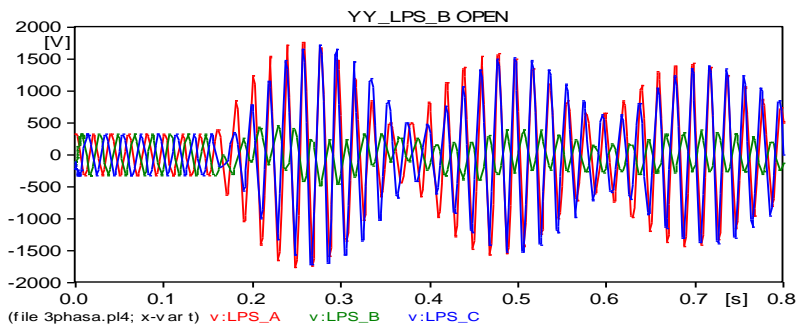
#### 4.1.2 Kondisi Operasi *Switching* sistem Terbuka Satu Fasa

Pada kondisi ini diberikan gangguan berupa operasi *switching* terbuka satu fasa pada rangkaian simulasi feroresonansi. Operasi *switching* dilakukan pada fasa S pada detik ke 0,15. Variabel yang diamati

pada simulasi ini adalah tegangan primer ( $V_p$ ) dan tegangan sekunder ( $V_s$ ) dari transformator distribusi.



(a)



(b)

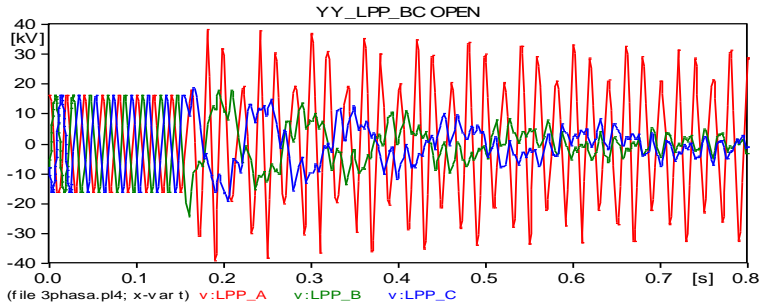
**Gambar 4.3** Respon Tegangan Transformator Distribusi Terhubung Bintang-Bintang dalam Kondisi *Switching* di Fasa S, (a) Sisi Primer Fasa R,S, dan T ; (b) Sisi Sekunder Fasa R, S, dan T.

Dapat dilihat respon tegangan tersebut ketika dilakukan operasi *switching* terbuka satu fasa seperti pada gambar 4.3, terlihat bahwa operasi *switching* satu fasa terbuka pada transformator distribusi terhubung Bintang-Bintang akan mengakibatkan feroresonansi dengan tipe cenderung *Subharmonic Mode*.

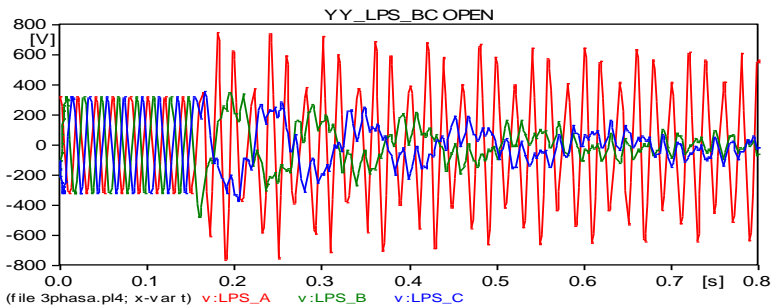
#### 4.1.3 Kondisi Operasi *Switching* Sistem Terbuka Dua Fasa

Pada kondisi ini diberikan gangguan berupa operasi *switching* terbuka dua fasa pada rangkaian simulasi feroresonansi. Operasi

*switching* dilakukan pada fasa S dan T pada detik ke 0,15. Variabel yang diamati pada simulasi ini adalah tegangan primer ( $V_p$ ) dan tegangan sekunder ( $V_s$ ) dari transformator distribusi.



(a)



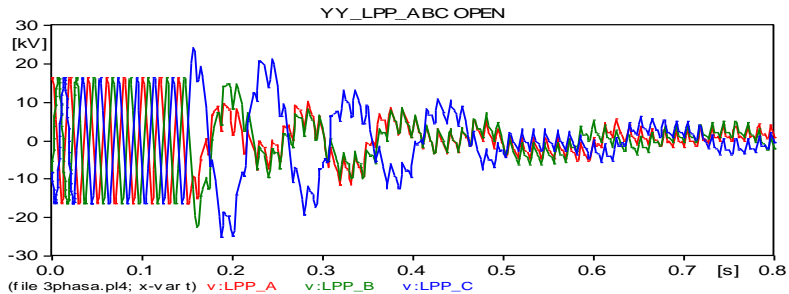
(b)

**Gambar 4.4** Respon Tegangan Transformator Distribusi Terhubung Bintang-Bintang dalam Kondisi *Switching* di Fasa S dan T, (a) Sisi Primer Fasa R, S, dan T ; (b) Sisi Sekunder Fasa R, S, dan T.

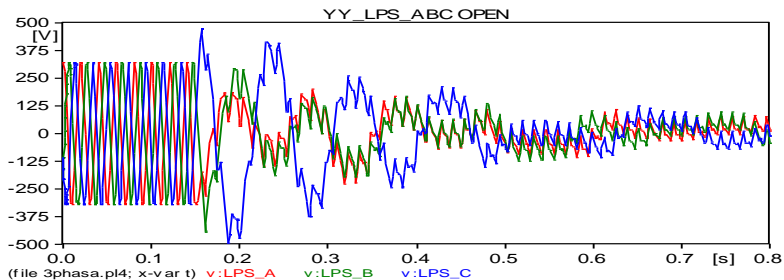
Dapat dilihat respon tegangan tersebut ketika dilakukan operasi *switching* terbuka dua fasa seperti pada gambar 4.4. Terlihat pada fasa R bahwa operasi *switching* ini dapat mengakibatkan feroresonansi dengan tipe cenderung *Subharmonic Mode*. Namun terdapat perbedaan pada fasa S dan T, operasi *switching* ini dapat mengakibatkan feroresonansi dengan tipe *Quasi-periodic Mode*.

#### 4.1.4 Kondisi Operasi *Switching* Sistem Terbuka Tiga Fasa

Pada kondisi ini diberikan gangguan berupa operasi *switching* terbuka tiga fasa pada rangkaian simulasi feroresonansi. Operasi *switching* dilakukan pada fasa R, S, dan T pada detik ke 0,15. Variabel yang diamati pada simulasi ini adalah tegangan primer (Vp) dan tegangan sekunder (Vs) dari transformator distribusi.



(a)



(b)

**Gambar 4.5** Respon Tegangan Transformator Distribusi Terhubung Bintang-Bintang dalam Kondisi *Switching* di Fasa R, S, dan T, (a) Sisi Primer Fasa R, S, dan T ; (b) Sisi Sekunder Fasa R, S, dan T.

Dapat dilihat respon tegangan tersebut ketika dilakukan operasi *switching* terbuka tiga fasa pada gambar 4.5, terlihat bahwa gelombang tegangan mengalami distorsi harmonisa, namun gelombang tersebut cenderung berkurang menuju nol karena diberikan operasi *switching* terbuka tiga fasa yang menandakan saluran terbuka

sepenuhnya. Pada operasi *switching* ini mengakibatkan feroresonansi dengan tipe cenderung *Quasi-periodic Mode*.

#### 4.1.5 Hasil Pengukuran Tegangan Transformator Distribusi Terhubung Bintang-Bintang

Tabel 4.1 merupakan hasil pengukuran tegangan transformator distribusi terhubung Bintang- Bintang, dapat terlihat bahwa gangguan operasi *switching* menyebabkan sistem distribusi mengalami *overvoltage* pada fasa-fasa tertentu.

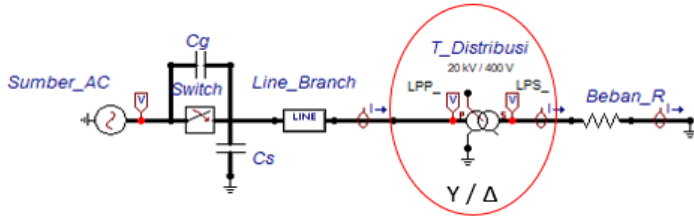
**Tabel 4.1.** Hasil Pengukuran Tegangan Transformator Distribusi Terhubung Bintang-Bintang

| Kondisi<br><i>Switching</i><br><i>g</i> | Tegangan Puncak<br>Primer (kV) |       |       | Tegangan Puncak<br>Sekunder (kV) |       |       | Feroresonansi |
|---|--------------------------------|-------|-------|----------------------------------|-------|-------|---------------|
|   | R                              | S     | T     | R                                | S     | T     |               |
| Normal                                  | 16,35                          | 16,35 | 16,35 | 0,326                            | 0,326 | 0,326 | - / -         |
| S Open                                  | 90,5                           | 23,76 | 87,71 | 1,77                             | 0,47  | 1,71  | Y / Y         |
| S,T Open                                | 38,16                          | 17,94 | 18,74 | 0,75                             | 0,35  | 0,35  | Y / Y         |
| R,S,T Open                              | 10,3                           | 14,86 | 24,29 | 0,2                              | 0,29  | 0,48  | Y / Y         |

Kondisi operasi *switching* satu fasa terbuka menyebabkan *overvoltage* terparah yakni sebesar 90,5 kV pada fasa R di sisi primer dan 1,77 kV pada fasa R di sisi sekunder. Lalu, kondisi operasi *switching* dua fasa terbuka menyebabkan *overvoltage* terparah yakni sebesar 38,16 kV pada fasa R di sisi primer dan 0,75 kV pada fasa R di sisi sekunder. Sedangkan pada kondisi operasi *switching* tiga fasa terbuka menyebabkan *overvoltage* terparah yakni sebesar 24,29 kV pada fasa T di sisi primer dan 0,48 kV pada fasa T di sisi sekunder.

#### 4.2 Simulasi Rangkaian Feroresonansi dengan Transformator Distribusi Terhubung Bintang-Segitiga (Y-Δ)

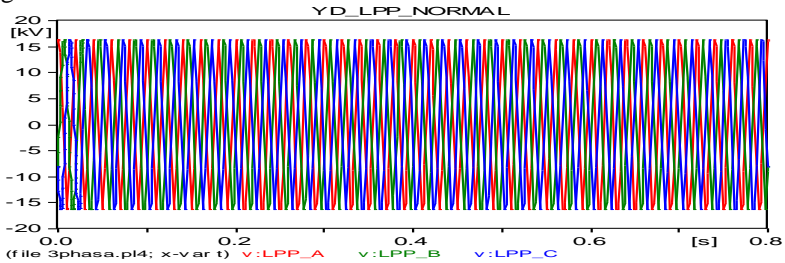
Pada simulasi rangkaian feroresonansi ini digunakan transformator distribusi dengan konfigurasi belitan terhubung bintang pada sisi primer dan terhubung segitiga pada sisi sekunder. Simulasi rangkaian feroresonansi ini dapat dilihat pada gambar 4.6.



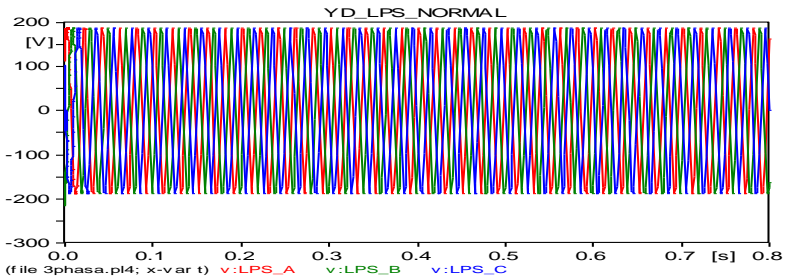
**Gambar 4.6** Simulasi Feroresonansi dengan Transformator Distribusi Terhubung Bintang-Segitiga.

#### 4.2.1 Kondisi Normal

Pada kondisi normal, hasil pengukuran tegangan puncak *line-neutral* ( $V_{peak_{L-N}}$ ) pada sisi primer transformator distribusi sebesar 16,35 kV, sedangkan pada sisi sekunder transformator distribusi didapatkan tegangan puncak *line-neutral* ( $V_{peak_{L-N}}$ ) sebesar 0,187 V. Plot respon tegangan puncak pada sisi primer dan sisi sekunder dapat dilihat pada gambar 4.7.



(a)



(b)

**Gambar 4.7** Respon Tegangan Transformator Distribusi Terhubung Bintang-Segitiga dalam Kondisi Normal, (a) Sisi Primer Fasa R, S, dan T ; (b) Sisi Sekunder Fasa R, S, dan T.

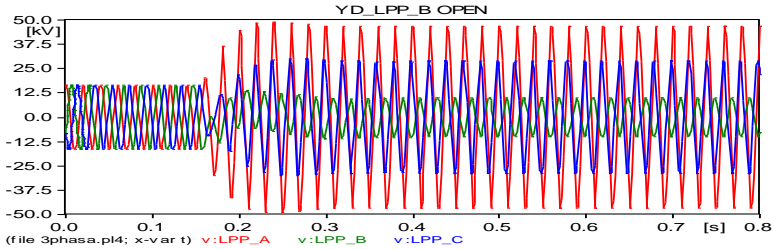
Secara teori, pada transformator terhubung Bintang-Segitiga, tegangan *line-line* primer dan sekunder memiliki rasio sebesar  $1/\sqrt{3}$  kali rasio setiap transformator. Sehingga secara perhitungan tegangan di konfisi normal dapat dicari dengan menggunakan persamaan :

$$V_{L-Npeak} = V_{L-Nrms} \times \sqrt{2} \times \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (4.3)$$

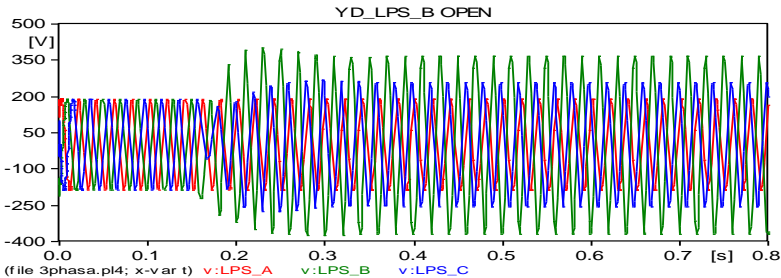
Sisi Sekunder :  $V_{L-Npeak} = 230,94 \times \sqrt{2} \times \frac{1}{\sqrt{3}} = 188,56 \text{ V}$

#### 4.2.2 Kondisi Operasi *Switching* Sistem Terbuka Satu Fasa

Pada kondisi ini diberikan gangguan berupa operasi *switching* terbuka satu fasa pada rangkaian simulasi feroresonansi. Operasi *switching* dilakukan pada fasa S pada detik ke 0,15. Variabel yang diamati pada simulasi ini adalah tegangan primer ( $V_p$ ) dan tegangan sekunder ( $V_s$ ) dari transformator distribusi.



(a)



(b)

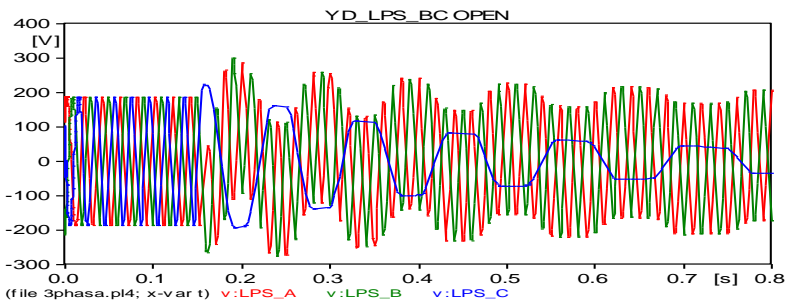
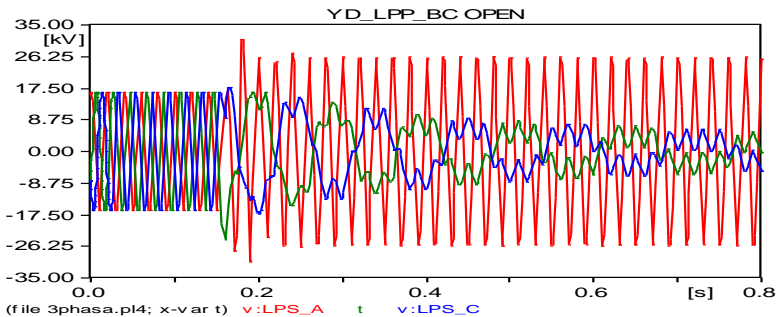


**Gambar 4.8** Respon Tegangan Transformator Distribusi Terhubung Bintang-Segitiga dalam Kondisi *Switching* di Fasa S, (a) Sisi Primer Fasa R,S, dan T ; (b) Sisi Sekunder Fasa R, S, dan T.

Dapat dilihat respon tegangan seperti pada gambar 4.8, terlihat pada sisi primer maupun sekunder transformator distribusi mengalami peristiwa resonansi biasa yang ditambah dengan adanya *overvoltage* pada respon gelombang tegangannya, feroresonansi cenderung tidak muncul pada transformator distribusi terhubung bintang-segitiga ini ketika diberikan gangguan berupa operasi *switching* terbuka satu fasa.

#### 4.2.3 Kondisi Operasi *Switching* Sistem Terbuka Dua Fasa

Pada kondisi ini diberikan gangguan berupa operasi *switching* terbuka dua fasa pada rangkaian simulasi feroresonansi. Operasi *switching* dilakukan pada fasa S dan T pada detik ke 0,15. Variabel yang diamati pada simulasi ini adalah tegangan primer ( $V_p$ ) dan tegangan sekunder ( $V_s$ ) dari transformator distribusi.

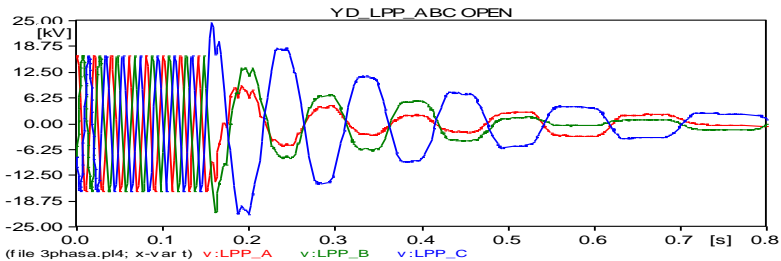


**Gambar 4.9** Respon Tegangan Transformator Distribusi Terhubung Bintang-Segitiga dalam Kondisi *Switching* di Fasa S dan T, (a) Sisi Primer Fasa R,S, dan T ; (b) Sisi Sekunder Fasa R, S, dan T.

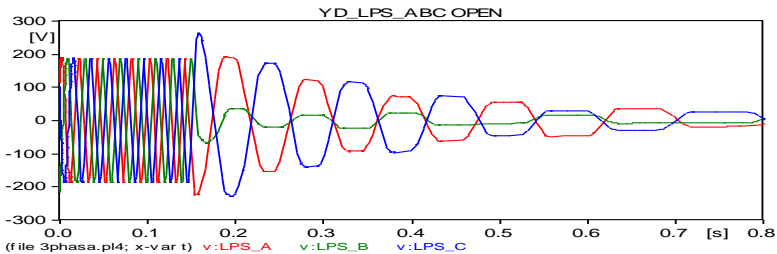
Dapat dilihat respon tegangan tersebut ketika dilakukan operasi *switching* terbuka dua fasa seperti pada gambar 4.9. Di sisi primer transformator distribusi seperti gambar 4.9a, pada fasa R terlihat adanya *overvoltage* namun hal ini tidak dapat dikategorikan sebagai feroresonansi melainkan hanya resonansi biasa, sedangkan pada fasa S dan T muncul feroresonansi cenderung bertipe *Quasi-periodic Mode*. Di sisi sekunder transformator distribusi seperti gambar 4.9b, feroresonansi yang muncul di ketiga fasa tersebut cenderung bertipe *Subharmonic Mode*.

#### 4.2.4 Kondisi Operasi *Switching* Sistem Terbuka Tiga Fasa

Pada kondisi ini diberikan gangguan berupa operasi *switching* terbuka tiga fasa pada rangkaian simulasi feroresonansi. Operasi *switching* dilakukan pada fasa R, S, dan T pada detik ke 0,15. Variabel yang diamati pada simulasi ini adalah tegangan primer ( $V_p$ ) dan tegangan sekunder ( $V_s$ ) dari transformator distribusi.



(a)



(b)

**Gambar 4.10** Respon Tegangan Transformator Distribusi Terhubung Bintang-Segitiga dalam Kondisi *Switching* di Fasa R, S, dan T. (a) Sisi Primer fasa R,S, dan T ; (b) Sisi Sekunder fasa R, S, dan T.

Dapat dilihat respon tegangan tersebut ketika dilakukan operasi *switching* terbuka tiga fasa seperti pada gambar 4.10. Terlihat pada gambar 4.10a, feroresonansi yang muncul cenderung bertipe *Subharmonic Mode*, namun karena diberikan operasi *switching* terbuka tiga fasa ini mengakibatkan feroresonansi cepat teredam. Sedangkan pada gambar 4.10b, feroresonansi yang muncul cenderung bertipe *Subharmonic Mode* pada respon gelombang tegangannya.

#### 4.2.5 Hasil Pengukuran Tegangan Transformator Distribusi Terhubung Bintang-Segitiga

Tabel 4.2 merupakan hasil pengukuran tegangan transformator distribusi terhubung Bintang-Segitiga, dapat terlihat bahwa gangguan operasi *switching* menyebabkan sistem distribusi mengalami *overvoltage* pada fasa-fasa tertentu.

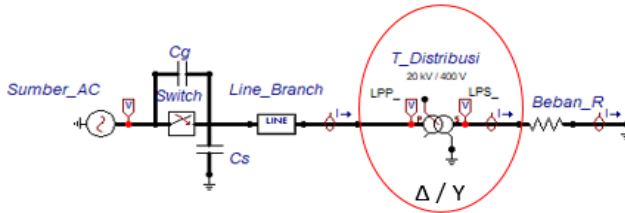
**Tabel 4.2.** Hasil Pengukuran Tegangan Transformator Distribusi Terhubung Bintang-Segitiga

| Kondisi<br><i>Switching</i><br>g | Tegangan Puncak<br>Primer (kV) |       |       | Tegangan Puncak<br>Sekunder (kV) |       |       | Feroresonansi |
|----------------------------------|--------------------------------|-------|-------|----------------------------------|-------|-------|---------------|
|                                  | R                              | S     | T     | R                                | S     | T     |               |
| Normal                           | 16,35                          | 16,35 | 16,35 | 0,187                            | 0,187 | 0,187 | - / -         |
| S Open                           | 49,1                           | 14,03 | 30,03 | 0,187                            | 0,401 | 0,267 | T / T         |
| S,T Open                         | 31                             | 16,25 | 17,78 | 0,285                            | 0,301 | 0,224 | Y / Y         |
| R,S,T Open                       | 9,17                           | 13,4  | 24,42 | 0,192                            | 0,035 | 0,264 | Y / Y         |

Kondisi operasi *switching* satu fasa terbuka menyebabkan *overvoltage* terparah yakni sebesar 49,1 kV pada fasa R di sisi primer dan 0,401 kV pada fasa S di sisi sekunder. Lalu, kondisi operasi *switching* dua fasa terbuka menyebabkan *overvoltage* terparah yakni sebesar 31 kV pada fasa R di sisi primer dan 0,301 kV pada fasa S di sisi sekunder. Sedangkan pada kondisi operasi *switching* tiga fasa terbuka menyebabkan *overvoltage* terparah yakni sebesar 24,42 kV pada fasa T di sisi primer dan 0,264 kV pada fasa T di sisi sekunder.

### 8.1 4.3 Simulasi Rangkaian Feroresonansi dengan Transformator Distribusi Terhubung Segitiga- Bintang ( $\Delta$ -Y)

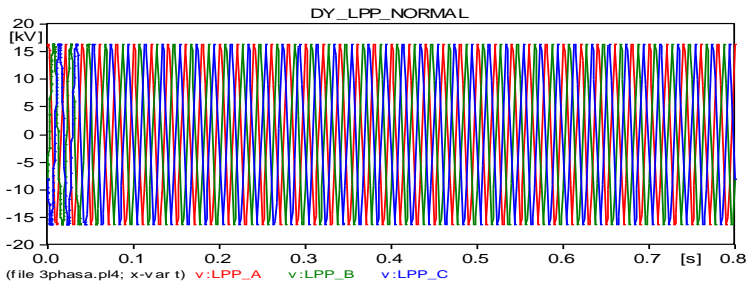
Pada simulasi rangkaian feroresonansi ini digunakan transformator distribusi dengan konfigurasi belitan terhubung segitiga pada sisi primer dan terhubung bintang pada sisi sekunder. Simulasi rangkaian feroresonansi ini dapat dilihat pada gambar 4.11.



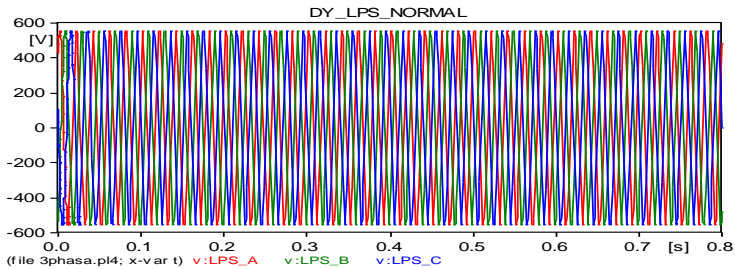
**Gambar 4.11** Simulasi Feroresonansi dengan Transformator Distribusi Terhubung Segitiga-Bintang.

#### 4.3.1 Kondisi Normal

Pada kondisi normal, hasil pengukuran tegangan puncak *line-neutral* ( $V_{peak_{L-N}}$ ) pada sisi primer transformator distribusi sebesar 16,35 kV, sedangkan pada sisi sekunder sebesar 0,554 kV. Plot respon tegangan puncak pada sisi primer dan sisi sekunder dapat dilihat pada gambar 4.12.



(a)



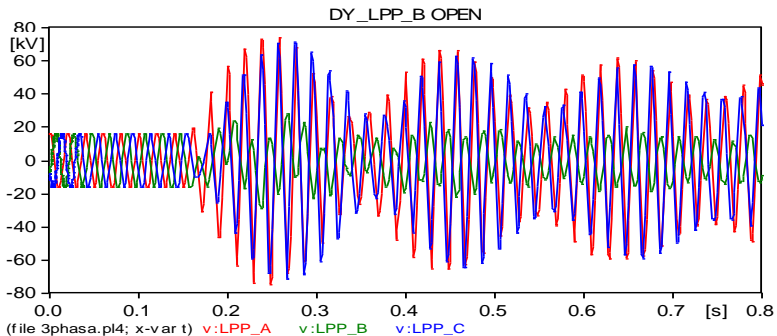
(b)

**Gambar 4.12** Respon Tegangan Transformator Distribusi Terhubung Segitiga-Bintang dalam Kondisi Normal, (a) Sisi Primer Fasa R, S, dan T ; (b) Sisi Sekunder Fasa R, S, dan T.

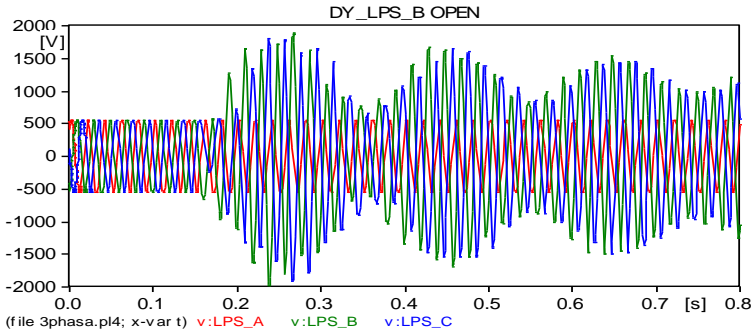
#### 4.3.2 Kondisi Operasi *Switching* Sistem Terbuka Satu Fasa

Pada kondisi ini diberikan gangguan berupa operasi *switching* terbuka satu fasa pada rangkaian simulasi feroresonansi. Operasi *switching* dilakukan pada fasa S pada detik ke 0,15. Variabel yang diamati pada simulasi ini adalah tegangan primer ( $V_p$ ) dan tegangan sekunder ( $V_s$ ) dari transformator distribusi.

Dapat dilihat respon tegangan seperti pada gambar 4.13, pembukaan *switching* satu fasa pada simulasi rangkaian feroresonansi ini mengakibatkan feroresonansi dengan tipe cenderung *Subharmonic Mode* baik pada sisi primer maupun sisi sekunder transformator distribusi.



(a)



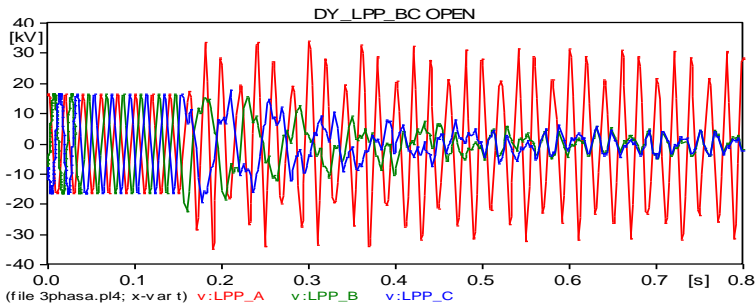
(b)

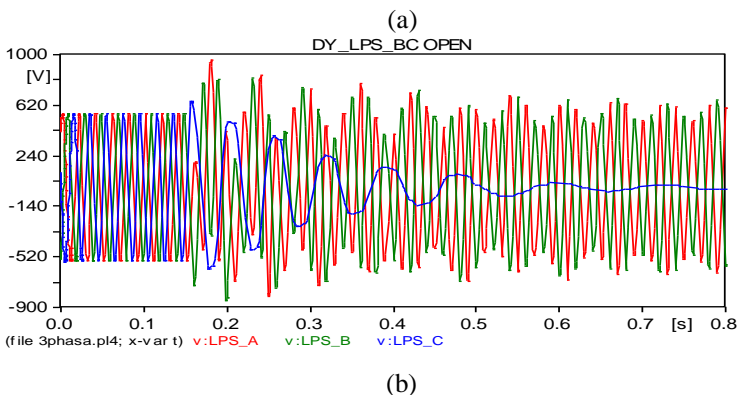
**Gambar 4.13** Respon Tegangan Transformator Distribusi Terhubung Segitiga-Bintang dalam Kondisi *Switching* di Fasa S, (a) Sisi Primer fasa R,S, dan T ; (b) Sisi Sekunder fasa R, S, dan T.

### 4.3.3 Kondisi Operasi *Switching* Sistem Terbuka Dua Fasa

Pada kondisi ini diberikan gangguan berupa operasi *switching* terbuka dua fasa pada rangkaian simulasi feroresonansi. Operasi *switching* dilakukan pada fasa S dan T pada detik ke 0,15. Variabel yang diamati pada simulasi ini adalah tegangan primer ( $V_p$ ) dan tegangan sekunder ( $V_s$ ) dari transformator distribusi.

Dapat dilihat respon tegangan seperti pada gambar 4.14a, bahwa pembukaan *switching* dua fasa mengakibatkan feroresonansi pada fasa R dengan tipe cenderung *Subharmonic Mode*, namun fasa S dan T mengalami feroresonansi cenderung bertipe *Quasi-periodic Mode*. Lalu pada gambar 4.14b, pembukaan *switching* dua fasa mengakibatkan feroresonansi cenderung bertipe *Subharmonic Mode*.



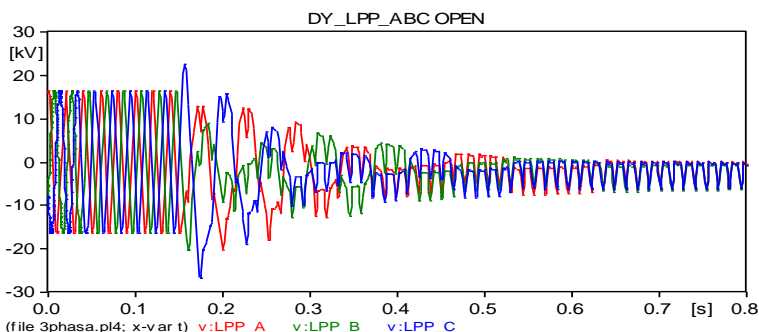


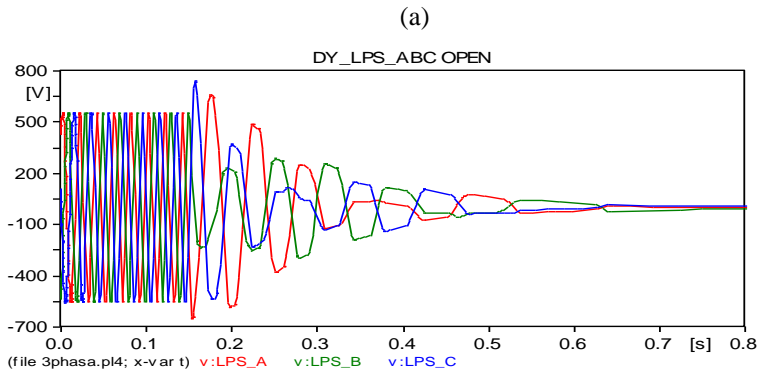
**Gambar 4.14** Respon Tegangan Transformator Distribusi Terhubung Segitiga-Bintang dalam Kondisi *Switching* di Fasa S dan T, (a) Sisi Primer fasa R,S, dan T ; (b) Sisi Sekunder fasa R, S, dan T.

#### 4.3.4 Kondisi Operasi *Switching* Sistem Terbuka Tiga Fasa

Pada kondisi ini diberikan gangguan berupa operasi *switching* terbuka tiga fasa pada rangkaian simulasi feroresonansi. Operasi *switching* dilakukan pada fasa R, S, dan T pada detik ke 0,15. Variabel yang diamati pada simulasi ini adalah tegangan primer ( $V_p$ ) dan tegangan sekunder ( $V_s$ ) dari transformator distribusi.

Dapat dilihat respon tegangan seperti pada gambar 4.15a, pembukaan *switching* tiga fasa pada simulasi rangkaian feroresonansi ini mengakibatkan feroresonansi cenderung bertipe *Quasi-periodic Mode*, namun pada gambar 4.15b, feroresonansi yang muncul cenderung bertipe *Subharmonic Mode*.





**Gambar 4.15** Respon Tegangan Transformator Distribusi Terhubung Segitiga-Bintang dalam Kondisi *Switching* di Fasa R, S, dan T, (a) Sisi Primer fasa R,S, dan T ; (b) Sisi Sekunder fasa R, S, dan T.

#### 4.3.5 Hasil Pengukuran Tegangan Transformator Distribusi Terhubung Segitiga-Bintang

Tabel 4.3 merupakan hasil pengukuran tegangan transformator distribusi terhubung Segitiga-Bintang, dapat terlihat bahwa gangguan operasi *switching* menyebabkan sistem distribusi mengalami *overvoltage* pada fasa-fasa tertentu.

**Tabel 4.3** Hasil Pengukuran Tegangan Transformator Distribusi Terhubung Segitiga-Bintang

| Kondisi<br><i>Switching</i><br><i>g</i> | Tegangan Puncak<br>Primer (kV) |       |       | Tegangan Puncak<br>Sekunder (kV) |       |       | Feror<br>esona<br>nsi |
|---|--------------------------------|-------|-------|----------------------------------|-------|-------|-----------------------|
|   | R                              | S     | T     | R                                | S     | T     |                       |
| <b>Normal</b>                           | 16,35                          | 16,35 | 16,35 | 0,554                            | 0,554 | 0,554 | - / -                 |
| <b>S Open</b>                           | 74,15                          | 28,4  | 71,17 | 0,554                            | 1,888 | 1,801 | Y / Y                 |
| <b>S,T<br/>Open</b>                     | 33,84                          | 15,38 | 17,91 | 0,961                            | 0,821 | 0,652 | Y / Y                 |
| <b>R,S,T<br/>Open</b>                   | 12,89                          | 8,98  | 22,49 | 0,664                            | 0,234 | 0,738 | Y / Y                 |

Kondisi operasi *switching* satu fasa terbuka menyebabkan *overvoltage* terparah yakni sebesar 74,15 kV pada fasa R di sisi primer dan 1,888 kV pada fasa S di sisi sekunder. Lalu, kondisi operasi *switching*

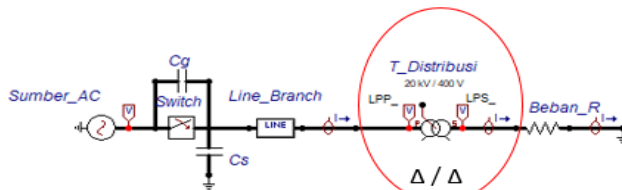


dua fasa terbuka menyebabkan *overvoltage* terparah yakni sebesar 33,84 kV pada fasa R di sisi primer dan 0,961 kV pada fasa R di sisi sekunder. Sedangkan pada kondisi operasi *switching* tiga fasa terbuka menyebabkan *overvoltage* terparah yakni sebesar 22,49 kV pada fasa T di sisi primer dan 0,738 kV pada fasa T di sisi sekunder.

## 8.2 4.4 Simulasi Rangkaian Feroresonansi dengan Transformator Distribusi Terhubung Segitiga- Segitiga ( $\Delta$ - $\Delta$ )

Pada simulasi rangkaian feroresonansi ini digunakan transformator distribusi dengan konfigurasi belitan terhubung segitiga pada sisi primer dan terhubung segitiga pada sisi sekunder. Simulasi rangkaian feroresonansi ini dapat dilihat pada gambar 4.16.

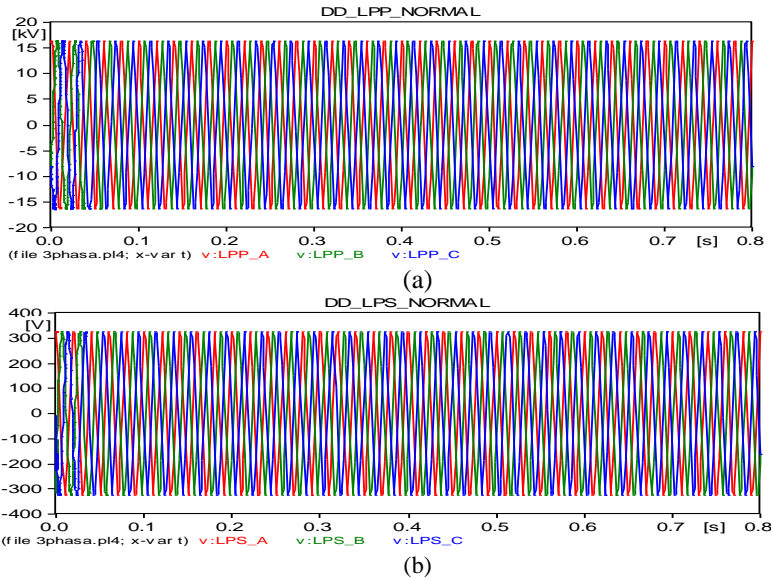
Sama seperti rangkaian feroresonansi sebelumnya, sumber tegangan yang digunakan dalam ini yakni 20 kV<sub>L-Lrms</sub> dengan frekuensi sistem 50 Hz. Simulasi yang dilakukan pada tiga macam parameter gangguan yang mampu memicu terjadinya feroresonansi, yakni operasi *switching* satu fasa, dua fasa, dan tiga fasa terbuka.



**Gambar 4.16** Simulasi Feroresonansi dengan Transformator Distribusi Terhubung Segitiga-Segitiga.

### 4.4.1 Kondisi Normal

Pada kondisi normal transformator distribusi terhubung segitiga-segitiga ini hasil pengukuran tegangan puncak *line-neutral* ( $V_{peak\ L-N}$ ) pada sisi primer transformator distribusi sebesar 16,35 kV, sedangkan pada sisi sekunder sebesar 0,326 V. Plot respon tegangan puncak pada sisi primer dan sisi sekunder dapat dilihat pada gambar 4.17.

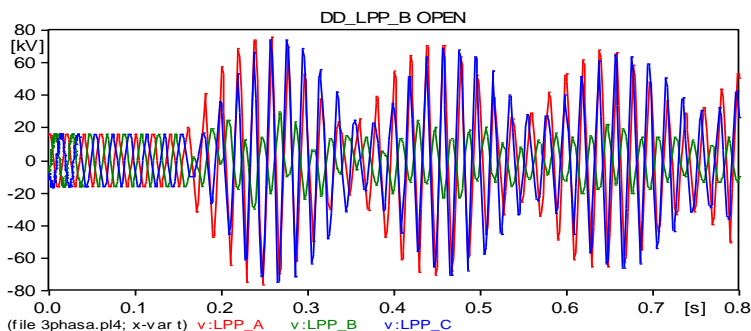


**Gambar 4.17** Respon Tegangan Transformator Distribusi Terhubung Segitiga-Segitiga dalam Kondisi Normal, (a) Sisi Primer Fasa R, S, dan T ; (b) Sisi Sekunder Fasa R, S, dan T.

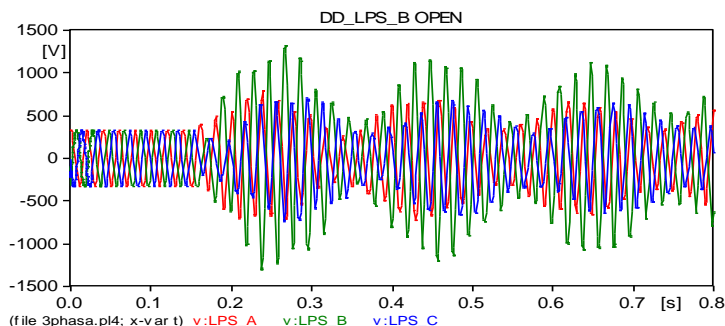
#### 4.4.2 Kondisi Operasi *Switching* Sistem Terbuka Satu Fasa

Pada kondisi ini diberikan gangguan berupa operasi *switching* terbuka satu fasa pada rangkaian simulasi feroresonansi. Operasi *switching* dilakukan pada fasa S pada detik ke 0,15. Variabel yang diamati pada simulasi ini adalah tegangan primer ( $V_p$ ) dan tegangan sekunder ( $V_s$ ) dari transformator distribusi.

Dapat dilihat respon tegangan seperti pada gambar 4.18, pembukaan *switching* satu fasa pada simulasi rangkaian feroresonansi dengan transformator terhubung segitiga-segitiga ini dapat mengakibatkan feroresonansi dengan tipe cenderung *Subharmonic Mode* di sisi primer maupun sekunder transformator distribusi.



(a)



(b)

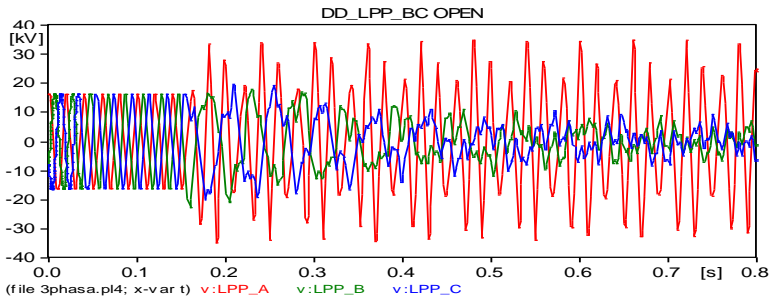
**Gambar 4.18.** Respon Tegangan Transformator Distribusi Terhubung Segitiga-Segitiga dalam Kondisi *Switching* di Fasa S, (a) Sisi Primer fasa R, S, dan T ; (b) Sisi Sekunder fasa R, S, dan T.

#### 4.4.3 Kondisi Operasi *Switching* Sistem Terbuka Dua Fasa

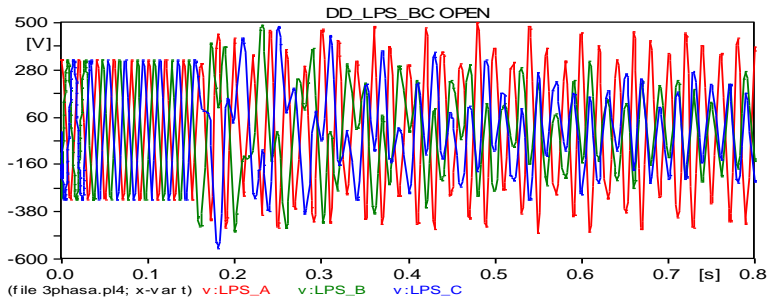
Pada kondisi ini diberikan gangguan berupa operasi *switching* terbuka dua fasa pada rangkaian simulasi feroresonansi. Operasi *switching* dilakukan pada fasa S dan T pada detik ke 0,15. Variabel yang diamati pada simulasi ini adalah tegangan primer ( $V_p$ ) dan tegangan sekunder ( $V_s$ ) dari transformator distribusi.

Dapat dilihat respon tegangan seperti pada gambar 4.19a, pembukaan *switching* dua fasa pada simulasi rangkaian feroresonansi ini mengakibatkan feroresonansi pada fasa R dengan tipe cenderung *Subharmonic Mode*, namun fasa S dan T mengalami feroresonansi cenderung bertipe *Quasi-periodic Mode*. Lalu pada gambar 4.19b,

pembukaan *switching* dua fasa mengakibatkan feroresonansi cenderung bertipe *Subharmonic Mode*.



(a)



(b)

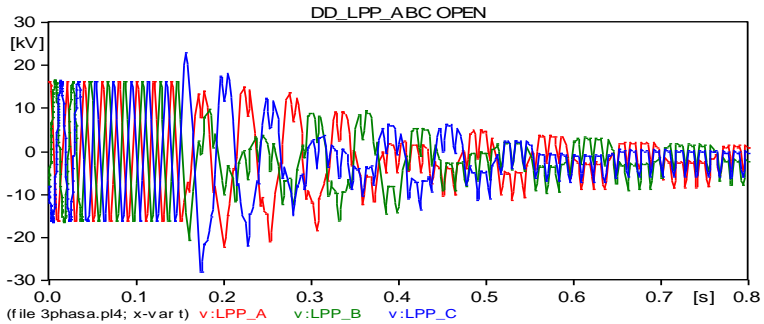
**Gambar 4.19** Respon Tegangan Transformator Distribusi Terhubung Segitiga-Segitiga dalam Kondisi *Switching* di Fasa S dan T, (a) Sisi Primer Fasa R, S, dan T ; (b) Sisi Sekunder Fasa R, S, dan T.

#### 4.4.4 Kondisi Operasi *Switching* Sistem Terbuka Tiga Fasa

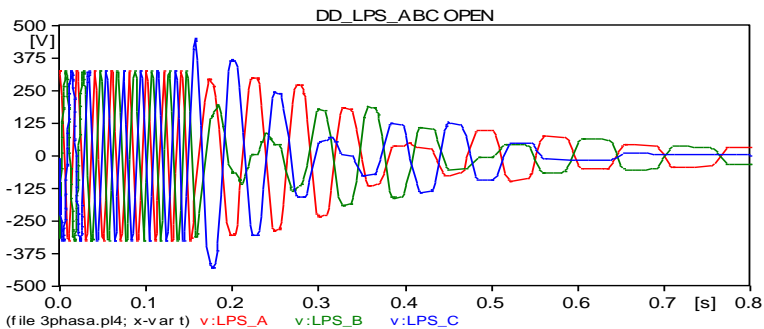
Pada kondisi ini diberikan gangguan berupa operasi *switching* terbuka tiga fasa pada rangkaian simulasi feroresonansi. Operasi *switching* dilakukan pada fasa R, S, dan T pada detik ke 0,15. Variabel yang diamati pada simulasi ini adalah tegangan primer ( $V_p$ ) dan tegangan sekunder ( $V_s$ ) dari transformator distribusi.

Dapat dilihat respon tegangan seperti pada gambar 4.20a, pembukaan *switching* tiga fasa pada simulasi rangkaian feroresonansi ini mengakibatkan feroresonansi cenderung bertipe *Quasi-periodic Mode*,

namun pada gambar 4.20b, feroresonansi yang muncul cenderung bertipe *Subharmonic Mode*.



(a)



(b)

**Gambar 4.20** Respon Tegangan Transformator Distribusi Terhubung Segitiga-Segitiga dalam Kondisi *Switching* di Fasa R, S, dan T, (a) Sisi Primer fasa R,S, dan T ; (b) Sisi Sekunder fasa R, S, dan T.

#### 4.4.5 Hasil Pengukuran Tegangan Transformator Distribusi Terhubung Segitiga-Segitiga

Tabel 4.5 merupakan hasil pengukuran tegangan transformator distribusi terhubung Segitiga-Segitiga, dapat terlihat bahwa gangguan operasi *switching* menyebabkan sistem distribusi mengalami *overvoltage* pada fasa-fasa tertentu.

**Tabel 4.4** Hasil Pengukuran Tegangan Transformator Distribusi Terhubung Segitiga-Segitiga

| Kondisi<br><i>Switching</i><br><i>g</i> | Tegangan Puncak<br>Primer (kV) |       |       | Tegangan Puncak<br>Sekunder (kV) |       |       | Feror<br>esona<br>nsi |
|---|--------------------------------|-------|-------|----------------------------------|-------|-------|-----------------------|
|   | R                              | S     | T     | R                                | S     | T     |                       |
| <b>Normal</b>                           | 16,35                          | 16,35 | 16,35 | 0,326                            | 0,326 | 0,326 | - / -                 |
| <b>S Open</b>                           | 76,05                          | 29,85 | 74,29 | 0,787                            | 1,317 | 0,701 | Y / Y                 |
| <b>S,T<br/>Open</b>                     | 35,01                          | 17,97 | 19,63 | 0,497                            | 0,489 | 0,479 | Y / Y                 |
| <b>R,S,T<br/>Open</b>                   | 15,08                          | 9,84  | 22,8  | 0,301                            | 0,196 | 0,449 | Y / Y                 |

Kondisi operasi *switching* satu fasa terbuka menyebabkan *overvoltage* terparah yakni sebesar 76,05 kV pada fasa R di sisi primer dan 1,317 kV pada fasa S di sisi sekunder. Lalu, kondisi operasi *switching* dua fasa terbuka menyebabkan *overvoltage* terparah yakni sebesar 35,01 kV pada fasa R di sisi primer dan 0,497 kV pada fasa R di sisi sekunder. Sedangkan pada kondisi operasi *switching* tiga fasa terbuka menyebabkan *overvoltage* terparah yakni sebesar 22,8 kV pada fasa T di sisi primer dan 0,449 kV pada fasa T di sisi sekunder.

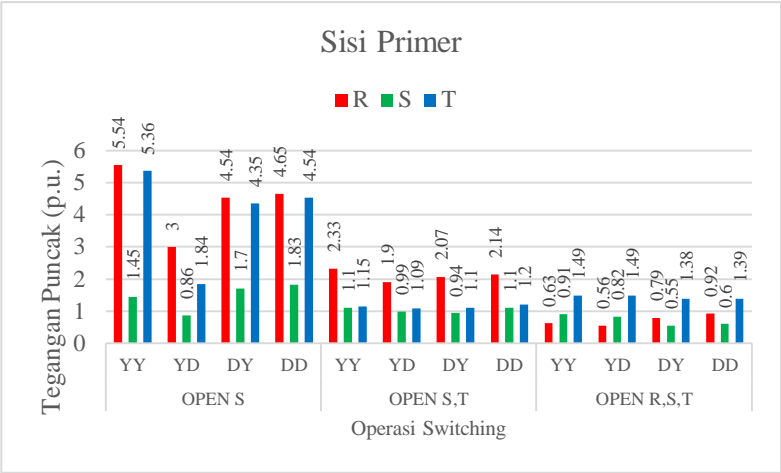
#### 4.5 Tegangan Puncak Transformator Distribusi

Hasil pengukuran tegangan pada simulasi yang telah dilakukan memiliki nilai yang berbeda-beda di setiap perbedaan konfigurasi belitan transformator distribusi ketika diberikan operasi *switching* satu fasa terbuka, dua fasa terbuka, dan tiga fasa terbuka.

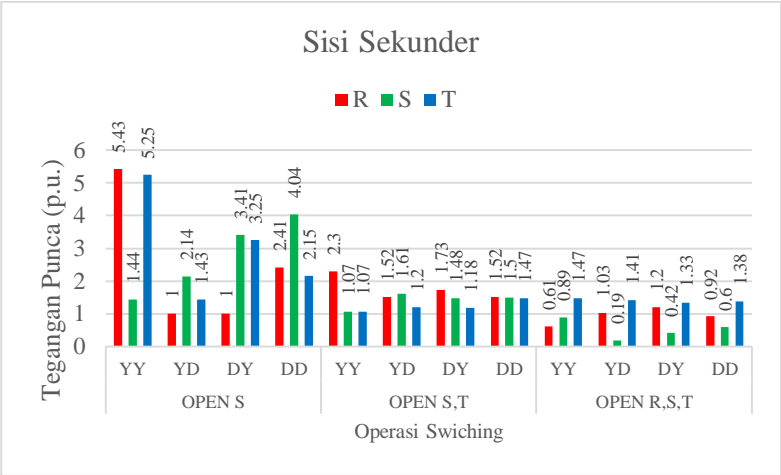
Gambar 4.21 merupakan grafik yang menunjukkan nilai tegangan puncak dari ketiga operasi *switching* pada sisi primer dan sisi sekunder transformator distribusi. Tegangan puncak tersebut dalam satuan per unit yang dibandingkan dengan tegangan normalnya. Berdasarkan grafik tersebut, terlihat tegangan puncak terbesar terjadi ketika transformator distribusi terhubung Bintang-Bintang diberikan operasi *switching* satu fasa, sehingga dapat dikatakan transformator distribusi terhubung Bintang-Bintang paling rentan terhadap *overvoltage* akibat feroresonansi. Selain itu dapat terlihat dari grafik tersebut bahwa transformator distribusi terhubung Bintang-Segitiga memiliki pengaruh paling rendah terhadap *overvoltage* akibat feroresonansi, sehingga dapat dikatakan transformator distribusi terhubung Bintang-Segitiga paling tahan terhadap *overvoltage* akibat feroresonansi.

Operasi *switching* satu fasa terbuka dapat mengakibatkan sistem mengalami adanya *overvoltage* paling besar akibat pengaruh dari

feroresonansi dibandingkan dengan operasi *switching* lainnya yaitu operasi *switching* dua fasa terbuka dan operasi *switching* tiga fasa terbuka, hal ini dikarenakan pembukaan *switching* satu fasa pada sistem merupakan operasi pembukaan yang tidak seimbang sehingga dapat mengakibatkan ketidakstabilan yang cukup parah dan dapat membahayakan bagi sistem jaringan distribusi. Biasanya operasi *switching* satu fasa terbuka ini diakibatkan oleh adanya gangguan seperti hubung singkat satu fasa ke tanah.



(a)



(b)

**Gambar 4.21** Grafik Tegangan Puncak Transformator Distribusi, (a) Sisi Primer dan (b) Sisi Sekunder.



## BAB 5

### PENUTUP

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi rangkaian feroresonansi pada studi ini, dapat ditarik kesimpulan bahwa :

1. Transformator distribusi terhubung Bintang-Bintang paling rentan terhadap *overvoltage* akibat feroresonansi. Sedangkan, transformator distribusi terhubung Bintang-Segitiga paling tahan terhadap *overvoltage* akibat feroresonansi.
2. Respon tegangan sistem dengan transformator distribusi terhubung Bintang-Bintang memiliki nilai *overvoltage* akibat feroresonansi terbesar yakni 5,54 p.u di sisi primer dan 5,43 p.u di sisi sekunder. Respon tegangan sistem dengan transformator distribusi terhubung Bintang-Segitiga memiliki nilai *overvoltage* akibat feroresonansi terbesar yakni 3 p.u di sisi primer dan 2,14 p.u di sisi sekunder. Respon tegangan sistem dengan transformator distribusi terhubung Segitiga-Bintang memiliki nilai *overvoltage* akibat feroresonansi terbesar yakni 4,54 p.u di sisi primer dan 3,41 p.u di sisi sekunder. Respon tegangan sistem dengan transformator distribusi terhubung Segitiga-Segitiga memiliki nilai *overvoltage* akibat feroresonansi terbesar yakni 4,65 p.u di sisi primer dan 4,04 p.u di sisi sekunder.
3. Operasi *switching* satu fasa memunculkan adanya *overvoltage* paling besar dibandingkan operasi *switching* dua fasa dan tiga fasa, hal ini dikarenakan pembukaan *switching* satu fasa pada sistem merupakan operasi pembukaan yang tidak seimbang sehingga dapat mengakibatkan ketidakstabilan yang cukup parah dan dapat membahayakan bagi sistem jaringan distribusi.
4. Operasi *switching* satu fasa yang terjadi pada sistem dapat mengakibatkan munculnya feroresonansi dengan karakteristik cenderung bertipe *Subharmonic Mode*. Lalu, operasi *switching* dua fasa pada sistem dapat mengakibatkan munculnya feroresonansi dengan karakteristik cenderung bertipe *Subharmonic Mode* dan *Quasi-periodic Mode*. Sedangkan, operasi *switching* tiga fasa pada sistem dapat mengakibatkan munculnya feroresonansi dengan karakteristik cenderung bertipe *Quasi-periodic Mode*.

## **5.2 Saran**

Saran yang dapat diberikan dari studi ini adalah melakukan studi lebih lanjut terkait pengujian secara eksperimen untuk mengidentifikasi feroresonansi dengan menggunakan transformator yang berbeda konfigurasi belitannya. Studi ini merupakan tahap awal identifikasi munculnya feroresonansi pada sistem tenaga listrik dengan harapan dapat dikembangkan lebih lanjut dan dijadikan acuan sebagai pengambilan kebijakan terhadap perancangan komponen-komponen yang dapat meredam feroresonansi.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. L. Tobing, *Peralatan Tegangan Tinggi*, 2nd ed. Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara, Medan: Erlangga, 2012.
- [2] G. Mokryani, M. R. Haghifam, H. Latafat, P. Aliparast, and A. Abdollahy, "Analysis of Ferroresonance in a 20kV Distribution Network," *2nd Int. Conf. Power Electron. Intell. Transp. Syst. IEEE*, pp. 31–36, 2009.
- [3] P. Elmo, "A Tutorial on Ferroresonance," *IEEE*, no. in Group ABB Inc 40th Annual Western Protective Relay Conference, pp. 676–704, Oct. 2013.
- [4] M. Esmaeli, M. Rostami, and G. B. Gharehpetian, "The Effect of Various Types of DG Interconnection Transformer on Ferroresonance," *IEEE*, p. 6, 2013.
- [5] M. Yogi Yusuf, Firdaus, and Feranita, "Analisa Konfigurasi Hubungan Primer dan Sekunder Transformator 3 Fasa 380/24 V Terhadap Beban Non Linier," *Jom FTEKNIK Jur. Tek. Elektro Univ. Riau Pekanbaru*, vol. 3, p. 12, Feb. 2016.
- [6] Satria Seventino Simamora, I Made Yulistya Negara, dan Daniar Fahmi, "*Studi Pemasangan Damping Reaktor Untuk Mengatasi Feroresonansi Pada Incoming 20 KV GIS Tandes*", Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2015.
- [7] D. Suswanto, *Sistem Distribusi Tenaga Listrik*, Edisi Pertama. Universitas Negeri Padang, 2009.
- [8] Javier Arturo Corea Araujo, "Modeling And Analysis Of Power Transformers Under Ferroresonance Phenomenon", Universitat Rovira, Virgili, 2015.
- [9] Stephen J. Chapman, "*Electric Machinery Fundamentals 5<sup>th</sup> edition*", Mc- Graw Hill, USA, 2012.
- [10] Y. Yamagata, S. Nishiwaki, T. Koshizuka, N. Takahashi, and M. Kosakada, "Ferroresonance by Open-Phase on Transformer with Delta Winding and Grounded Neutral," *IEEE*, pp. 292–296, 2002.

*---Halaman ini sengaja dikosongkan---*

## LAMPIRAN

Listing program ATP File pada ATPDraw:

```

BEGIN NEW DATA CASE
C -----
---
C Generated by ATPDRAW  May, Monday 15, 2017
C A Bonneville Power Administration program
C by H.K.Høidalen at SEfAS/NTNU-NORWAY 1994-
2015
C -----
---
C  dT  >< Tmax >< Xopt >< Copt ><Epsiln>
    1.E-6    .8
    500      1      1      1      1      0      0      1      0
C   1      2      3      4      5      6      7      8
C
345678901234567890123456789012345678901234567890
123456789012345678901234567890
/BRANCH
C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R  >< L  >< C  >
C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R  >< A  >< B
><Leng><><>0
    X0005AX0006A                                .9025
0
    X0005BX0006B                                .9025
0
    X0005CX0006C                                .9025
0
    TRANSFORMER                                1.      1.X0007A
1.5E6                                           0
        0.009735                                25.4911765
        0.0103125                               35.2588235
        0.016875                                57.1764706
        0.02671875                             66.7058824
        0.05015625                             74.3294118
        0.09375                                79.0941176
        1.15                                    81.
        2.311                                81.4764706

```

|         | 10.                | 86.                |
|---------|--------------------|--------------------|
|         | 9999               |                    |
|         | 1LPP_A             | 5..63662 2.E4      |
|         | 2LPS_A             | .01805 .0083 400.  |
|         | TRANSFORMER X0007A | X0007B             |
| 0       |                    |                    |
|         | 1LPP_B             |                    |
|         | 2LPS_B             |                    |
|         | TRANSFORMER X0007A | X0007C             |
| 0       |                    |                    |
|         | 1LPP_C             |                    |
|         | 2LPS_C             |                    |
|         | -1X0004AX0003A     | .003394.793340.255 |
| 15. 0 0 |                    | 0                  |
|         | -2X0004BX0003B     | .00128.0079312.275 |
| 15. 0 0 |                    | 0                  |
|         | -3X0004CX0003C     |                    |
| 0       |                    |                    |
|         | X0001BX0002B       | .01                |
| 0       |                    |                    |
|         | X0001CX0002C       | .01                |
| 0       |                    |                    |
|         | X0001AX0002A       | .01                |
| 0       |                    |                    |
|         | X0002B             | .0001              |
| 0       |                    |                    |
|         | X0002C             | .0001              |
| 0       |                    |                    |
|         | X0002A             | .0001              |
| 0       |                    |                    |
|         | LSRC_AX0004A       | .0046              |
| 0       |                    |                    |
|         | LSRC_BX0004B       | .0046              |
| 0       |                    |                    |
|         | LSRC_CX0004C       | .0046              |
| 0       |                    |                    |
|         | X0004A             | 7.5E-5             |
| 0       |                    |                    |
|         | X0004B             | 7.5E-5             |
| 0       |                    |                    |

```

X0004C 7.5E-5
0
/SWITCH
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie
><Vf/CLOP >< type >
X0003ALPP_A
MEASURING 1
X0003BLPP_B
MEASURING 1
X0003CLPP_C
MEASURING 1
LSRC_AX0004A -1. 10.
0
LSRC_BX0004B -1. .15
0
LSRC_CX0004C -1. .15
0
LPS_A X0005A
MEASURING 1
LPS_B X0005B
MEASURING 1
LPS_C X0005C
MEASURING 1
X0006A
MEASURING 1
X0006B
MEASURING 1
X0006C
MEASURING 1
X0001AX0002A -1. 10.
0
X0001BX0002B -1. .1
0
X0001CX0002C -1. .1
0
/SOURCE
C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1
>< T1 >< TSTART >< TSTOP >
14LSRC_A 16329.9316 50.
-1. 1.

```

|     |          |            |     |       |
|-----|----------|------------|-----|-------|
|     | 14LSRC_B | 16329.9316 | 50. | -120. |
| -1. | 1.       |            |     |       |
|     | 14LSRC_C | 16329.9316 | 50. | -240. |
| -1. | 1.       |            |     |       |

/OUTPUT

|       |        |        |        |       |       |       |       |
|-------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
|       | LSRC_A | LSRC_B | LSRC_C | LPP_A | LPP_B | LPP_C | LPS_A |
| LPS_B | LPS_C  |        |        |       |       |       |       |

BLANK BRANCH  
BLANK SWITCH  
BLANK SOURCE  
BLANK OUTPUT  
BLANK PLOT  
BEGIN NEW DATA CASE  
BLANK



## BIOGRAFI PENULIS



Dio Randa Damara lahir di Jakarta pada tanggal 11 November 1995. Dio merupakan anak bungsu dari pasangan Pepen Effendi dan Sulastri. Dio menempuh pendidikan dasar di SDN Bekasi Jaya VIII pada tahun 2001, kemudian melanjutkan sekolah di SMP Negeri 1 Bekasi pada tahun 2007, setelah itu melanjutkan pendidikan menengah atas di SMAN 1 Kota Bekasi pada tahun 2010. Pada tahun 2013, Dio melanjutkan studi S1 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Jurusan Teknik Elektro. Bidang studi yang diambil oleh Dio yaitu Teknik Sistem Tenaga. Saat ini Dio aktif sebagai asisten di Laboratorium Tegangan Tinggi.

E-mail : [dio.randmr@hotmail.com](mailto:dio.randmr@hotmail.com)

*---Halaman ini sengaja dikosongkan---*